

---

# Optimierung von Stoffaufbereitungs- prozessen nach Nachhaltigkeitskriterien

Optimisation of stock preparation unit operations according to  
sustainability indicators

Marja Birgit Ahola

Fachgebiet Papierfabrikation und Mechanische Verfahrenstechnik



TECHNISCHE  
UNIVERSITÄT  
DARMSTADT

---



Masterarbeit Nr. 55  
Master of Science Marja Birgit Ahola

**Optimierung von Stoffaufbereitungsprozessen nach  
Nachhaltigkeitskriterien**  
*(Optimisation of stock preparation unit operations according to  
sustainability indicators)*

Umweltschutz wird bei der Papierherstellung schon seit langer Zeit ernst genommen. So wurde z. B. der spezifische Wasserverbrauch oder auch der spez. Energiebedarf in den letzten Jahrzehnten erheblich gesenkt. Allerdings fehlen bisher Instrumente, um eine Optimierung der Nachhaltigkeit von Produkten und Prozessen über die verschiedenen Stufen der Wertschöpfungskette hinweg zu erreichen. Z. B. ist zu erwarten, dass ein höherer Ressourcenverbrauch und Energieeinsatz bei der Altpapieraufbereitung durchaus sinnvoll sein kann, wenn dadurch die Rezyklierbarkeit der Fasern verbessert und ein häufigeres Recycling möglich wird. Für eine solche Optimierung sind Modelle der einzelnen Grundprozesse nötig, welche in Ergänzung zu den heute üblichen Prozessmodellen auch alle für die Berechnung der relevanten Nachhaltigkeitsindikatoren Parameter mitführen. Solche Modelle sollen im Rahmen dieser Arbeit für die Grundprozesse der Altpapieraufbereitung Sortierung, Flotation und Dispergierung erstellt werden. Dazu kann teilweise auf Literatur zurück gegriffen werden. Es sind zusätzlich aber auch eigene Versuche und Messungen im Labor- und Industriemaßstab notwendig, um die Modellparameter zu bestimmen und die Modelle zu validieren. Die erforderlichen Messgrößen, wie z. B. spezifischer Energiebedarf oder spez. „CO<sub>2</sub>-Footprint“, werden in Zusammenarbeit mit der entsprechenden Projektgruppe des EU-Projektes REFFIBRE festgelegt.

Darmstadt, den 10.03.2014

Prof. Dr.-Ing. Samuel Schabel

---

Fachgebiet Papierfabrikation und Mechanische Verfahrenstechnik  
Fachbereich Maschinenbau  
Technische Universität Darmstadt  
Alexanderstraße 8, 64283 Darmstadt



---

## **Erklärung zur Masterthesis**

---

Hiermit versichere ich, die vorliegende Masterthesis ohne Hilfe Dritter und nur mit den angegebenen Quellen und Hilfsmitteln angefertigt zu haben. Alle Stellen, die Quellen entnommen wurden, sind als solche kenntlich gemacht. Diese Arbeit hat in gleicher oder ähnlicher Form noch keiner Prüfungsbehörde vorgelegen. In der abgegebenen Thesis stimmen die schriftliche und elektronische Fassung überein.

Darmstadt, den 26. Januar 2015

---

(Marja Birgit Ahola)

---

---

## Inhaltsverzeichnis

---

Erklärung zur Masterthesis .....	I
Inhaltsverzeichnis.....	I
1    Kurzfassung .....	1
2    Abstract .....	1
3    Einleitung .....	2
4    Stand des Wissens – Nachhaltigkeit .....	4
4.1    Definition Nachhaltigkeit.....	4
4.1.1    Drei-Säulen-Modell der Nachhaltigkeit.....	5
4.1.2    Nachhaltigkeitsdreieck.....	6
4.2    Nachhaltigkeitsstrategien - Effizienz-Suffizienz-Konsistenz .....	7
4.3    Konzepte zur Messung von Nachhaltigkeit .....	8
4.3.1    Nachhaltigkeitsindikatoren .....	9
4.3.1.1    Funktionen von Nachhaltigkeitsindikatoren.....	10
4.3.1.2    Herausforderungen bei der Entwicklung von Indikatoren.....	12
4.4    Technikfolgenabschätzung.....	12
4.4.1    Stoffstromanalyse.....	13
4.4.1.1    Material-Intensity per Service-Unit (MIPS).....	15
4.4.1.2    Ressourcenproduktivität .....	16
4.4.2    Lebenszyklusanalyse und Ökobilanzierung.....	17
4.5    Rolle des Unternehmens bei der Umsetzung von Nachhaltigkeit.....	17
4.6    Nachhaltigkeit in der Papierindustrie.....	18
5    Stand des Wissens – Altpapieraufbereitung.....	21
5.1    Feinsortierung .....	21
5.1.1    Drucksortierung .....	22
5.1.1.1    Aufbau eines Drucksortierers .....	23
5.1.1.2    Einflussparameter für den Sortiervorgang.....	25
5.1.1.3    Mathematische Beschreibung der Sortierung .....	27

5.2	Druckfarbenflotation .....	32
5.2.1	Aufbau einer Flotationszelle .....	33
5.2.1.1	Sulzer- Escher Wyss CF-Flotationszelle .....	34
5.2.1.2	Voith EcoCell-Flotationszelle .....	36
5.2.2	Einflussparameter für den Flotivorgang .....	38
5.2.3	Mathematische Beschreibung des Flotivorganges .....	38
5.3	Dispergierung .....	41
5.3.1	Aufbau eines Dispergers .....	42
5.3.1.1	Knet-Disperger .....	42
5.3.1.2	Scheibendisperger .....	43
5.3.2	Einflussparameter für den Dispergiervorgang .....	45
5.3.3	Mathematische Beschreibung des Dispergiervorganges .....	45
6	Vorüberlegungen .....	48
6.1	Modelle .....	48
6.2	Parameter .....	49
6.3	Indikatoren .....	50
6.4	Definition von Bilanzierungsziel und Untersuchungsrahmen .....	51
6.4.1	Anforderungsliste .....	54
6.4.1.1	Anforderungen aus der Aufgabenstellung .....	54
6.4.1.2	Weitere Anforderungen .....	55
6.5	Sachzielbilanz .....	56
6.6	Wirkungsbilanz .....	58
6.7	Interpretation und Auswertung .....	58
7	Aufbau der Stoffaufbereitungsanlagen .....	59
7.1	Feinsortierung .....	59
7.1.1	Anlage A .....	59
7.1.2	Anlage B .....	61
7.2	Flotation .....	66
7.2.1	Anlage A .....	66

7.2.1.1	Vorflotation.....	67
7.2.1.2	Nachflotation .....	68
7.2.2	Anlage B .....	70
7.2.2.1	Vorflotation.....	70
7.2.2.2	Nachflotation .....	71
7.3	Dispergierung.....	71
7.3.1	Anlage A .....	72
8	Versuchsdurchführung .....	72
8.1	Versuchsparameter.....	73
8.2	Faserfraktionierung nach Haindl-McNett .....	76
8.3	Ermittlung fasermorphologischer Eigenschaften (Kajaani Fiberlab) .....	78
8.4	Ermittlung des Glührückstandes bei 525 °C nach ISO 1762 .....	80
8.5	Bestimmung von Makrostickies nach INGEDE Methode Nr. 4.....	80
9	Ergebnisse und Diskussion .....	83
9.1	Getroffene allgemeine Annahmen .....	85
9.2	Aufbau der Modelle .....	86
9.3	Modellierung der Feinsortierung .....	89
9.3.1	Anlage A .....	90
9.3.2	Anlage B .....	93
9.4	Modellierung der Flotation .....	103
9.4.1	Anlage A .....	103
9.5	Modellierung der Dispergierung.....	109
9.5.1	Anlage A .....	109
10	Zusammenfassung und Ausblick .....	111
Tabellenverzeichnis.....		IV
Abbildungsverzeichnis.....		V
Literaturverzeichnis.....		VII
Formelzeichenverzeichnis.....		XI

---

## **1 Kurzfassung**

---

Das Recycling und die Aufbereitung von Altpapier zählen heutzutage zu den wichtigsten Verfahren zur Gewinnung von Rohstoffen für die Erzeugung von neuem Papier. Im Vergleich zu Papierprodukten aus Frischfasern verursacht das Recycling von Altpapier deutlich geringere Umweltbelastungen. Dennoch zählt die Papierindustrie zu den energieintensivsten Industriezweigen.

In dieser Arbeit wird der Frage nachgegangen, inwiefern sich Stoffaufbereitungsprozesse unter Nachhaltigkeitskriterien optimieren lassen. Neben der Feinsortierung und der Flotation wird zusätzlich die Dispergierung der Faserstoffe in den Stoffaufbereitungsanlagen zweier Industriepartner untersucht. Diese drei Teilprozesse stellen zeitgleich die wohl wichtigsten Abläufe dar, die ein Faserstoff in der Stoffaufbereitung zum Zweck der Aufbereitung durchlaufen muss. In dieser Arbeit werden Modelle der einzelnen Grundprozesse entwickelt, die für die Berechnung der relevanten Nachhaltigkeitsindikatoren Parameter mitführen. Zu diesen Parametern zählen beispielsweise die Charakterisierung des Entwässerungsverhaltens, sowie die Entstehung von nicht weiterverwertbaren Reststoffen.

---

## **2 Abstract**

---

The recycling and processing of waste paper are nowadays the most important processes for the recovery of raw materials for the production of new paper. Compared to paper products made from virgin fiber, the recycling of waste paper has a substantially lower environmental impact. Nevertheless, the paper industry is one of the most energy-intensive industries.

In this work, stock preparation processes are optimized taking account of sustainability criteria. In addition to the fine screening process and flotation process, the dispersion process is examined in the stock preparation plants of two industry partners. At the same time, these three sub-processes are the most important processes that a pulp must go through in stock preparation. In this work, models of these basic processes are developed which carry parameters for the calculation of the relevant sustainability indicators. These parameters include, for example, the energy and water consumption, as well as the emergence of non-recyclable waste materials.

---

### 3 Einleitung

---

In den vergangenen Jahren ist das Thema Nachhaltigkeit, begünstigt durch eine Verknappung weltweiter natürlicher Ressourcen und eine Veränderung des Klimas, zunehmend in das Interesse und das Bewusstsein der Öffentlichkeit gerückt. Somit stellt ein nachhaltiges Handeln auf unternehmerischer Ebene eine Maxime zur Sicherung des langfristigen Erfolges dar. Auch im Hinblick auf die Kommunikation zum Kunden stellt eine nachhaltige Unternehmenspolitik und Unternehmensführung, sowie die Vermarktung eines nachhaltig hergestellten Produktes, ein Alleinstellungsmerkmal auf dem Markt dar, welches letztendlich die Kaufentscheidung des Kunden positiv beeinflusst.

Der Prozess der Papierherstellung zählt zu den rohstoff- und energieintensivsten Produktionsprozessen. Es werden enorme Mengen an Wasser, Rohstoffen, Dampf und Strom zur Erzeugung von Papier benötigt. Ein Teil fällt dabei den Stoffaufbereitungsprozessen zu. Des Weiteren entstehen bei der Aufbereitung des Altpapiers Emissionen, die es zu begrenzen gilt. Dies gilt auch für die Entsorgung von anfallenden Reststoffen und Abwässern.

Im Rahmen einer restriktiveren Umweltgesetzgebung und stetig steigender Kosten, beispielsweise für die Abfallentsorgung, stellt ein umweltgerechtes Unternehmensverhalten eine wesentliche Entscheidungsgrundlage dar. Ein steigendes Umweltbewusstsein sowie die marktwirtschaftlichen Vorteile eines ökologischen- und recyclingbasierten Wirtschaftens machen für die papiererzeugenden Unternehmen weitere Gründe für eine Untersuchung und Neuausrichtung der Prozesse aus. Butterbrodt et al. [1] begrüßen eine präventive und engagierte Herangehensweise an umweltschutzpolitische Herausforderungen, die sich im Unternehmensalltag hervortun. Eine ökologische Unternehmensführung macht sich zunehmend auch ökonomisch bezahlt.



---

Die Zeiten, in denen ein sogenannter nachsorgender Umweltschutz („End-of-pipe“) betrieben wurde, sind demnach durch vorsorgende, nachhaltige Konzepte abgelöst worden. Kernthesen dieser Art von Unternehmensführung sind:

- Die Bewahrung von Rohstoffen,
- die Vermeidung oder Reduktion von Emissionen,
- die Abwendung von Betriebsausfällen und
- die Vermeidung von Gefahrstoffen [1].

Bei der Umsetzung einer nachhaltigen Unternehmensführung bzw. der Durchsetzung eines umweltfokussierten Managementansatzes handelt es sich um einen iterativen Prozess, welcher im heutigen Sprachgebrauch durch die Begriffe der „nachhaltige Entwicklung“ („Sustainable Development“) und „Nachhaltigkeit“ („Sustainability“) geprägt ist.

In dieser Arbeit sollen die Stoffaufbereitungsprozesse im Hinblick auf den vorliegenden Grad der Nachhaltigkeit untersucht sowie Werkzeuge für die Optimierung entwickelt werden. Zu diesem Zweck werden Modelle entwickelt, die den Stoffaufbereitungsprozess in den Anlagen zweier Industriepartner abbilden. Durch eine gezielte Veränderung einzelner Parameter innerhalb dieser Modelle, ist es später möglich, die Stoffaufbereitungsprozesse nach ihrem Grad der Nachhaltigkeit zu beurteilen.

---

## 4 Stand des Wissens – Nachhaltigkeit

---

Eine nachhaltige Entwicklung und Unternehmensführung haben sich in den vergangenen Jahren zu Leitthemen in der europäischen Unternehmens- und Industriekultur entwickelt. Die Ausprägung und Interpretation des Begriffes ist stark abhängig von der Art des Unternehmens, dem zugeordnetem Industriezweig sowie von der Art der hergestellten Produkte.

In diesem Kapitel wird der Stand des Wissens begutachtet. Es wird zunächst der Begriff der Nachhaltigkeit erläutert und in diesem Zusammenhang auf das Drei-Säulen-Modell und das Nachhaltigkeitsdreieck eingegangen. Im Anschluss werden die zur Erfassung von Nachhaltigkeit zu ermittelnden Indikatoren erörtert. Eben diese Nachhaltigkeitsindikatoren stellen die Grundlage für Stoffstrom- und Lebenszyklusanalyse dar. Den Abschluss dieses Kapitels bilden die Betrachtung der Rolle des Unternehmens im Zuge einer nachhaltigen Unternehmensführung sowie die Darstellung der Nachhaltigkeit in der Papierindustrie.

---

### 4.1 Definition Nachhaltigkeit

---

Nachhaltigkeit beschreibt umfassende Handlungsprinzipien zur Nutzung von Ressourcen. Ressourcen umfassen sowohl materielle als auch immaterielle Güter. Die Zielvorstellungen eines nachhaltigen Zustandes stellen ein stabiles System sowie die Erhaltung einer angemessenen (oftmals natürlichen) Regenerationsfähigkeit des betrachteten Systems dar. In Abhängigkeit des betrachteten Gutes haben sich diverse Definitionen von Nachhaltigkeit herausgebildet.

Die Begriffe „*nachhaltige Entwicklung*“ und „*Nachhaltigkeit*“ werden im Allgemeinen Sprachgebrauch oftmals synonym verwendet. Laut Grunwald und Kopfmüller beschreibt die *nachhaltige Entwicklung* einen „Prozess gesellschaftlicher Veränderung“. *Nachhaltigkeit* definiert wiederum das Ende eines solchen Prozesses. Ein nachhaltiger Entwicklungsprozess zielt auf eine Verbesserung der Lebenssituation aktueller und zukünftiger Generationen ab [2] [3].

---

Im Bericht der Brundtland-Kommission aus dem Jahr 1987 heißt es dazu:

*„Dauerhafte Entwicklung<sup>1</sup> ist Entwicklung, die die Bedürfnisse der Gegenwart befriedigt, ohne zu riskieren, dass künftige Generationen ihre eigenen Bedürfnisse nicht befriedigen können.“ [4]*

Der Begriff der nachhaltigen Entwicklung wurde stark durch die UN-Konferenz „Umwelt und Entwicklung“ in Rio de Janeiro geprägt. Die internationale Staatengemeinschaft einigte sich im Jahr 1992 auf ein gemeinsames nachhaltiges Entwicklungsleitbild [4]. Dieses nachhaltige Entwicklungsmotiv sieht die Gleichstellung von umweltpolitischen, ökonomischen und sozialen Entwicklungszielen vor. Ziele einer nachhaltigen Entwicklung sind neben einem Rückgang der Emissionen eine Steigerung der Ressourceneffizienz und -produktivität sowie die Erhaltung bzw. Erhöhung von Beständen erneuerbarer Ressourcen [5] [6].

Grunwald und Kopfmüller sehen in der nachhaltigen Entwicklung keinen „ausschließlich wissenschaftlich bestimmbareren Begriff, sondern ein gesellschaftlich-politisches und damit normatives Leitbild“ [2]. Diese Perspektive wird von Wullenweber geteilt, die in Nachhaltigkeit bzw. nachhaltiger Entwicklung einen ähnlich undefinierbaren Zustand bzw. Prozess sieht, wie in der Definition von „Freiheit“ oder „Gerechtigkeit“ [7].

Im Lauf der Zeit haben sich mehrere Modelle etabliert, um die Nachhaltigkeit einer Gesellschaft, eines Landes, eines Unternehmens oder eines Prozesses zu bestimmen. Im folgenden Unterkapitel werden die zwei wichtigsten etablierten Modelle zur Beschreibung von Nachhaltigkeit vorgestellt.

---

#### **4.1.1 Drei-Säulen-Modell der Nachhaltigkeit**

---

Zur Beschreibung von Nachhaltigkeit hat sich seit einiger Zeit ein Modell etabliert, welches die sogenannten drei Dimensionen der Nachhaltigkeit in eine Beziehung setzt. Das Drei-Säulen-Modell definiert die drei Aspekte Ökologie, Ökonomie und Soziales als

---

<sup>1</sup> Dauerhafte Entwicklung wird synonym zur nachhaltigen Entwicklung genutzt.

---

gleichberechtigte Säulen der Nachhaltigkeit [8]. Durch die Säulendarstellung wird die Gleichberechtigung zwischen den drei Nachhaltigkeitsausprägungen hervorgehoben.

Das Drei-Säulen-Modell ist in den vergangenen Jahren recht häufig verändert worden. So ist beispielsweise der Begriff „Verantwortung“ wie ein verbindendes Dach über die drei Säulen gestellt worden [8]. Dabei spielt es zunächst keine Rolle, ob die Verantwortung gesellschaftlich oder politisch erzwungen wurde oder ob sie eine freiwillige Leistung eines Unternehmens darstellt. Das Drei-Säulen-Modell der Nachhaltigkeit ist in **Abbildung 1** dargestellt.

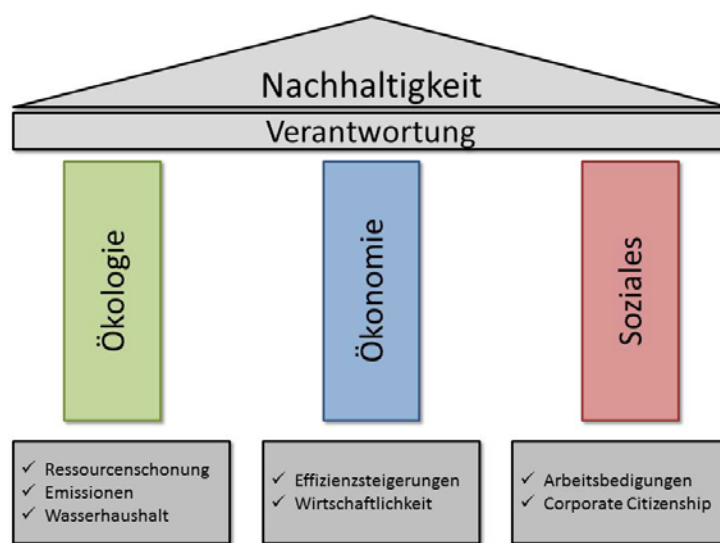


Abbildung 1 Drei-Säulen-Modell der Nachhaltigkeit (Darstellung in Anlehnung an [9] )

---

#### 4.1.2 Nachhaltigkeitsdreieck

---

Nachhaltigkeitsdreiecke werden oftmals als „Magische Dreiecke“ bezeichnet. Sie verdeutlichen, dass eine nachhaltige Entwicklung nur unter Berücksichtigung der drei Dimensionen – Ökologie, Ökonomie und Soziales – möglich ist. Das Dreieck ist in der Regel gleichseitig angelegt, um zu verdeutlichen, dass im Idealfall allen drei Seiten die gleiche Bedeutung zukommt. Die Darstellung im Nachhaltigkeitsdreieck ermöglicht insofern eine wertungsbezogene Ansicht, als dass die Ausprägung der drei Nachhaltigkeitsdimensionen im Dreieck dargestellt werden kann und so ein relativer Vergleich beispielsweise zwischen zwei Prozessen oder Unternehmen ermöglicht wird. Der Aufbau eines Nachhaltigkeitsdreieckes ist in **Abbildung 2** veranschaulicht.

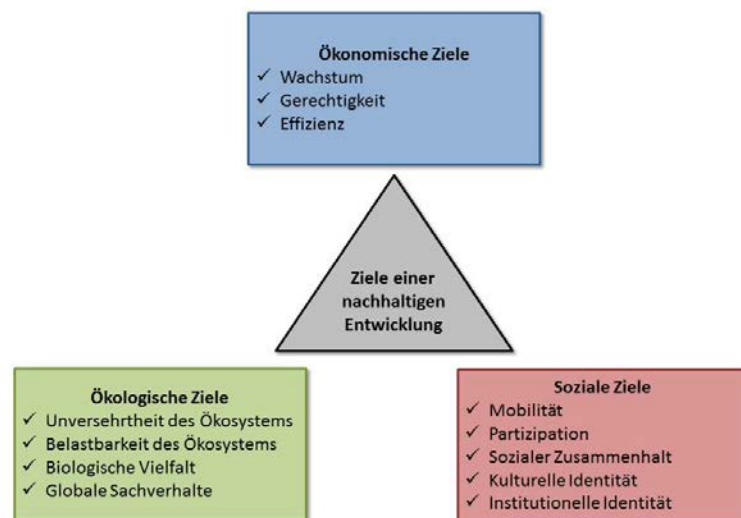


Abbildung 2 Nachhaltigkeitsdreieck (Darstellung in Anlehnung an [10])

---

## 4.2 Nachhaltigkeitsstrategien - Effizienz-Suffizienz-Konsistenz

---

Für eine erfolgreiche Umsetzung der drei Nachhaltigkeitsdimensionen, die in den vorangegangenen Kapiteln vorgestellt wurden, sind laut Schmidt-Bleek drei weitere Strategien besonders entscheidend. In diesem Zusammenhang wird von Effizienz, Suffizienz und Konsistenz gesprochen.

Die technische Verbesserung einer Anlage, so dass beispielsweise der Frischwasserverbrauch oder der Ausstoß von Emissionen gemindert werden kann, stellt einen effizienzsteigernden Prozess dar. Diese Art von Effizienzstrategie steht im Mittelpunkt der ökonomischen Prozessoptimierung und hat eine Erhöhung der Ressourcenproduktivität auf allen Stufen der Wertschöpfungskette zum Ziel. Durch diese Schritte kann zwar relativ gesehen der Ressourcenverbrauch langfristig gesenkt werden, dennoch haben diese effizienzsteigernden Maßnahmen keinen Einfluss auf das Konsumverhalten der Verbraucher [10]. Diese Steigerung der Effizienz kann somit nur dann nachhaltig sein, wenn dadurch tatsächlich ein geringerer Verbrauch einhergeht und dafür nicht an anderer Stelle mehr genutzt wird (sog. *Rebound Effekt*).

---

Schmidt-Bleek erläutert als Beispiel den Kauf eines Fahrzeugs mit einem geringen CO<sub>2</sub>-Ausstoß. Dies stellt zunächst eine nachhaltige Handlung dar, mit dem Ziel, den CO<sub>2</sub>-Ausstoß mit dem Kauf des neuen Fahrzeugs zu reduzieren. Wenn sich der Fahrer des Fahrzeugs nun jedoch des Einsparpotentials bewusst wird und aus diesem Grund mit dem Fahrzeug mehr Kilometer zurücklegt als zuvor, ist der nachhaltige Effekt dahin. Aus diesem Grund muss mit einer Steigerung der Effizienz zeitgleich eine Suffizienzstrategie einhergehen.

Die beiden erstgenannten Strategien zielen laut Baumast in einem Unternehmen auf eine Reduzierung des Mengendurchsatzes an Stoff- und Energieströmen ab. Im Rahmen der Konsistenzstrategie geht es darum, die aktuellen Produktionsprozesse so umzugestalten, dass eine Rückführung in die natürlichen Stoffkreisläufe gewährleistet ist [10].

Nur durch die simultane Implementierung der drei Strategien kann eine nachhaltige Entwicklung in allen drei Nachhaltigkeitsdimensionen erreicht werden.

---

### **4.3 Konzepte zur Messung von Nachhaltigkeit**

---

Um die Umsetzung von nachhaltiger Entwicklung nachvollziehbar und messbar zu machen, wurde in der Agenda 21, welche auf der Rio-Konferenz von der Staatengemeinschaft unterzeichnet wurde, die Ermittlung und Anwendung von Indikatoren gefordert. So heißt es dort:

*„Es müssen Indikatoren für nachhaltige Entwicklung erarbeitet werden, um eine solide Grundlage für die Entscheidungsfindung auf allen Ebenen zu schaffen und zu einer selbstregulierenden Nachhaltigkeit integrierter Umwelt- und Entwicklungssysteme beizutragen.“ [11]*

Diese anhand der Agenda 21 festgelegten Beurteilungskriterien sollen Trends in der nachhaltigen Entwicklung eines Landes, einer Region oder einer Gemeinde im Hinblick auf zentrale Themen, wie Ressourcenverbrauch oder auch Emissionen, mit Hilfe von möglichst langfristig angelegten Zeitreihen beschreiben. Die ermittelten Indikatoren sollen sowohl ökologische, ökonomische als auch soziale Entwicklungen durch Verknüpfungen, durch sogenannte „Interlinkages“, berücksichtigen.

---

### 4.3.1 Nachhaltigkeitsindikatoren


---

Um die Nachhaltigkeit eines technischen Systems bewerten zu können, werden Parameter benötigt, die den Grad der Nachhaltigkeit einer Anlage, eines Prozesses oder einer Apparatur charakterisieren. Diese Nachhaltigkeitsindikatoren werden im Rahmen des Nachhaltigkeitsmanagements ermittelt.

Indikatoren stellen symbolische Darstellungen in Form von Zahlen, Symbolen, Grafiken oder Farben dar, die einen Trend in einem komplexen System abbilden oder eine Eigenschaft eines Systems kommunizieren. Die Besonderheit der Indikatoren liegt in ihrer Eigenschaft, komplexe Sachverhalte konzentriert und vereinfacht abzubilden, so dass sie einfach verständlich und wissenschaftlich tragbar sind. Im Laufe der Zeit haben sich unterschiedliche, zumeist fachspezifische Indikatoren in verschiedenen Fachgebieten entwickelt. In Anbetracht der vielschichtigen und fachspezifisch ausgeprägten Definition von Nachhaltigkeit wurden unterschiedliche Methoden zur empirischen Darstellung von nachhaltiger Entwicklung ausgearbeitet [5].

Die Frage nach der Anzahl der Nachhaltigkeitsindikatoren, die zur ausreichenden Beschreibung eines Systems notwendig sind, gestaltet sich laut Grunwald und Kopfmüller [2] als schwierig. Systeme können sowohl durch einen einzelnen aggregierten Nachhaltigkeitsindikator als auch durch eine Reihe von ergänzenden Einzelindikatoren, also einem Indikatorensystem, beschrieben werden. Umfassende Abhängigkeiten erfordern zumeist eine größere Anzahl an Indikatoren, während für ein verständliches, praktisch anwendbares System eine begrenzte Anzahl an Indikatoren definiert werden sollte. Grunwald und Kopfmüller sehen in einem modifizierbaren Nachhaltigkeitsindikatoren-System, das an aktuelle Umstände angepasst werden kann, das Optimum. Laut Hák et al. sind Indikatorensysteme, welche es dem Anwender ermöglichen, zeitgleich zu beobachten, zu lernen, zu entscheiden und zu handeln, zu begünstigen. Braat sieht zudem die Notwendigkeit, dass Indikatoren über eine vorausschauende Eigenschaft verfügen sollten. Anderenfalls sieht man sich in einer Art „Teufelskreis“ aus Trial-and-Error gefangen [12] [13].

Die Managementregeln, welche durch die Enquete-Kommission „Schutz des Menschen und der Umwelt“ (1998) des deutschen Bundestages festgelegt wurden, stellen bereits eine überbetriebliche Formulierung von Indikatorensystemen dar.



---

Sie lassen sich sowohl auf einer globalen Ebene als auch auf einer unternehmensinternen Ebene integrieren und anwenden. Zu den Zielen der ökologischen Managementregeln zählen der Klimaschutz, die Naturverträglichkeit sowie die Erhaltung der Arten und Landschaftsvielfalt, die nachhaltige Nutzung erneuerbarer und nicht-erneuerbarer Ressourcen und die Umsetzung gesunder Lebensbedingungen [4].

Nach Ruedinger [14] ermöglicht die konsequente Einführung von Nachhaltigkeitsindikatoren eine Ergänzung zur derzeitigen Umweltberichterstattung, da sie neben ihrer allgemeinen einfachen Verständlichkeit und der Darstellung von Trends sowohl die ökonomische als auch die soziale Facette der Nachhaltigkeit abdecken.

---

#### **4.3.1.1 Funktionen von Nachhaltigkeitsindikatoren**

---

Nachhaltigkeitsindikatoren stellen eine Informationsgrundlage für unternehmerische Entscheidungsprozesse dar. Sie verfügen über vielseitige Funktionen und sollen neben der Ist-Situation auch Zukunftstrends abbilden können. Ein wichtiger Einsatzbereich von Indikatoren kommt zudem ihrer Warnfunktion zu. Fehlentwicklungen lassen sich durch Nachhaltigkeitsindikatoren vereinfacht abbilden, wie auch die Ableitung von Handlungsbedarf [15].

Laut Kuik und Verbruggen [12] werden in der Messtheorie immer dann Indikatoren zur Beschreibung eines Systems oder Konzeptes herangezogen, wenn dieses nicht vollständig auf Grundlage der allgemein anerkannten Regeln operationalisiert werden kann. Die vorrangige Funktion von Indikatoren liegt in der Vereinfachung eines Systemzusammenhangs. Die Indikatoren stellen Qualitäts- und Handlungsziele dar anhand derer die reale Entwicklung beurteilt werden kann [4]. Kuik und Verbruggen differenzieren zwischen zwei Anwendungsfällen von Indikatoren. In der Planung übernehmen Indikatoren die Aufgabe der Problem-Identifikation sowie der Zuordnung von Ressourcen nach sozio-ökonomischen Kriterien, während Indikatoren in der Kommunikationsfunktion die Übermittlung von Informationen übernehmen. Die Verwendung von Indikatoren stellt stets einen Kompromiss zwischen wissenschaftlicher Genauigkeit und der Nachfrage nach Informationen dar [12].



---

Laut Grunwald und Kopfmüller müssen Nachhaltigkeitsindikatoren vier Kernfunktionen erfüllen:

- Informationsfunktion,
- Orientierungsfunktion,
- Steuerungsfunktion und
- Kommunikationsfunktion.

Die wichtigste Anforderung an einen Einzelindikator oder an ein Indikatorensystem besteht darin, dass die gesamte Bandbreite der nachhaltigen Entwicklung, also sowohl die ökologische und ökonomische als auch die soziale Komponente dargestellt und präzisiert sein müssen. Das zu beschreibende Problemfeld, auf das die Nachhaltigkeitsindikatoren angewendet werden sollen, muss vollständig und repräsentativ entweder durch einen einzelnen aggregierten Indikator oder durch ein durch Interlinkages verknüpftes Indikatorensystem wiedergegeben werden. Die Informationsfunktion stellt des Weiteren sicher, dass die Betrachtungsgegenstände, welche durch den aggregierten Indikator oder das Indikatorensystem abgebildet werden, sowohl in qualitativer als auch in quantitativer Form messbar, analysierbar und zu bewerten sind. Die Bewertungsfunktion der Indikatoren ermöglicht eine Unterstützung von Zustands- und Trenddiagnosen. Sie erweist sich als hilfreich bei zeitlichen oder räumlichen Vergleichen verschiedener Indikatoren und ermöglicht die Identifikation von Störungen und entsprechendem Handlungsbedarf sowie die Analyse bestehender oder potenzieller Zielkonflikte.

Den Indikatoren kommt zusätzlich eine Bewertungsfunktion zu, da sie den Erfolg oder Misserfolg einer nachhaltigen Entwicklung bewerten und somit über die Erreichung gesetzter Ziele entscheiden. In diesem Zusammenhang ist zudem die Kommunikationsfunktion eines Indikators bedeutsam. Indikatoren sollen eine angemessen vereinfachte Darstellung und Vermittlung komplexer Sachverhalte sicherstellen und komplexe Zusammenhänge auch für unterschiedliche Adressaten verständlich vermitteln [13] [16].

Die Nachhaltigkeitsindikatoren sollten zudem auf Basis vorliegender Messwerte oder auf Grundlage verlässlicher Statistiken bestimmbar sein.

---

#### **4.3.1.2 Herausforderungen bei der Entwicklung von Indikatoren**

---

Bereits bei der Definition und Entwicklung von Nachhaltigkeitsindikatoren kann es zu Konflikten kommen. Die Frage nach der Anzahl von Indikatoren, welche zur lückenlosen Beschreibung eines Systems herangezogen werden müssen, spielt in diesem Zusammenhang eine wichtige Rolle. Im Falle einer zu geringen Anzahl an Nachhaltigkeitsindikatoren ist es äußerst wahrscheinlich, dass ein Großteil des Informationsgehaltes verloren geht. Im Falle einer Überbestimmtheit durch die Einführung von Interlinkages zwischen mehreren Indikatoren kommt es laut Schäfer [5] oftmals zu Zielkonflikten. So ist es beispielsweise möglich, dass bei der integrativen Betrachtung von Indikatoren einzelne Indikatoren auf kurze Sicht einen negativen Nachhaltigkeitstrend aufzeigen, während die alleinige Betrachtung eines Indikators eine nachhaltige Entwicklung aufzeigt.

Schäfer differenziert zudem zwischen zwei Arten von Interlinkages. Es können zum einen Wechselwirkungen zwischen Nachhaltigkeitsindikatoren einer Nachhaltigkeitsdimension oder zum anderen Verknüpfungen zwischen Nachhaltigkeitsindikatoren verschiedener Nachhaltigkeitsdimensionen betrachtet werden. Ein Beispiel für den ersten Fall sei der Zusammenhang zweier Umweltindikatoren, für den zweiten Fall die Interdependenz zwischen einem ökologischen und einem ökonomischen Indikator [5].

---

#### **4.4 Technikfolgenabschätzung**

---

Das Forschungsgebiet der Technikfolgenabschätzung ist ein in der Technikphilosophie und Techniksoziologie beheimatetes Wissensgebiet, welches sich mit der Beobachtung und Analyse von technischen und wissenschaftlichen Weiterentwicklungen kritisch auseinandersetzt und somit eng mit dem Forschungsgebiet der Nachhaltigkeitswissenschaft verknüpft ist.

Um die komplexen Zusammenhänge zwischen Technikentwicklung, Techniknutzung und den möglichen Folgen der Technik verstehen zu können, sind eine umfassende Sammlung von Daten sowie die Entwicklung von Methoden zur Planung und Bewertung von Prozessen erforderlich. Dieses Vorgehen wird unter dem Begriff der Systemanalyse

---

zusammengefasst. Neben der Stoffstromanalyse zählen auch die Lebenszyklusanalyse, die Input-Output-Analyse und die Risikoanalyse zu den Systemanalyseverfahren [17].

Nachfolgend sollen jedoch lediglich die Stoffstromanalyse als wichtigster Datenlieferant, sowie die Lebenszyklusanalyse, welche die nötigen Randbedingungen liefert, betrachtet werden.

---

#### **4.4.1 Stoffstromanalyse**

---

In den Phasen der Herstellung, Nutzung und Entsorgung eines Produktes entstehen Stoffströme unterschiedlichster Art. Die Analyse und Auswertung dieser Stoffströme gewinnt insbesondere im Kontext einer nachhaltigen Entwicklung zunehmend an Bedeutung. Es werden in diesem Zusammenhang drei Begriffe unterschieden: Stoffstromorganisation, Stoffstromanalyse und Stoffstrommanagement. Die Stoffstromorganisation stellt dabei die einfachste Untersuchung eines Prozesses oder Systems dar. Es werden die ein- und ausgehenden Stoffströme sowie die Betriebs- und Hilfsstoffe quantitativ erfasst. Über die qualitativen Eigenschaften eines Stoffstroms werden bei einer reinen Stoffstromorganisation keine Aussagen getroffen. Ebenso wird bei einer Stoffstromorganisation zumeist keine Aussage über die Nachhaltigkeit eines Prozesses oder Systems getroffen. Laut Friege et al. [18] liegt der entscheidende Unterschied zwischen einer reinen Organisation von Stoffströmen und dem weiter entwickelten Stoffstrommanagement in der Berücksichtigung von ökologischen, ökonomischen und sozialen Nachhaltigkeitsindikatoren. Das Stoffstrommanagement entwickelte sich in den vergangenen Jahren zunehmend aus lokalen, regionalen und globalen Umweltproblemen. Die ökologischen Ziele für das betriebliche und betriebsübergreifende Stoffstrommanagement sind dabei sowohl eigenverantwortlich durch die Unternehmen selbst bestimmt als auch staatlich vorgegeben [18]. Das Stoffstrommanagement ermöglicht als Erweiterung der Stoffstromanalyse einen ökonomischen Vergleich verschiedener Produktionsabläufe zur Ermittlung des Produktionszustandes mit der „besten Ökoeffektivität“. Ziel ist es, dass das Stoffstrommanagement, neben den ökonomischen Betriebszielen der Absatzsicherung und der Gewinnerzielung, ein Teil des betrieblichen Handelns wird.

---

Die Stoffstromanalyse ist laut Baumast stark technisch-naturwissenschaftlich geprägt, da sie physikalisch-technische Prozesse und Strukturen in einem Unternehmen analysiert und eine detaillierte verfahrenstechnische Untersuchung von betrieblichen Prozessen darstellt.

Die Bilanzierung der Stoff- und Energieströme erfolgt nach den physikalischen Gesetzmäßigkeiten der Energie- und Massenerhaltung [10, 18]. Im Fokus der Stoffstromanalyse steht wiederum eine Erhöhung der Ressourcenproduktivität [5, 16].

Ziel einer Stoffstromanalyse ist die Identifizierung, Qualifizierung und Quantifizierung eines Stoffstroms in einem definierten Untersuchungssystem. Das Untersuchungssystem besteht aus festgelegten technischen Verfahren oder Prozessen, aber auch eine Untersuchung einzelner Betriebe oder Regionen ist möglich [17].

Oftmals müssen im Rahmen einer Stoffstromanalyse umfassende, neue Daten erhoben werden. In diesem Zusammenhang ist es vielfach erforderlich Modellannahmen zu treffen, oder Prozesse durch Annäherungen oder iterative Herangehensweisen zu beschreiben. Dabei hat die Qualität und die Vollständigkeit der Daten einen entscheidenden Einfluss auf das Ergebnis und damit auch auf die Aussagefähigkeit einer Stoffstromanalyse.

Die Analyse von Stoffströmen ist stark quantitativ geprägt und ist kaum oder gar nicht auf die Qualität der beteiligten Stoffströme fokussiert. Das Kreislaufwirtschaftsgesetz bemisst beispielsweise den Erfolg eines Recyclingprozesses am Gewichtsanteil des rezyklierten Materials oder anhand des Anteils an Sekundärmaterial in den Neuprodukten. Die Qualität der Rezyklate und die Umweltauswirkungen, welche von den Verwertungsoptionen auf Technologie und Ökonomie ausgehen, bleiben zumeist unberücksichtigt [1, 19].

Zu den wichtigsten Ergebnissen einer Stoffstromanalyse zählen die Verringerung von Emissionen und Reststoffen sowie die Vermeidung oder Verminderung problematischer Stoffe sowie von Lärmbelastungen [20]. Die Reduktion von Emissionen und Reststoffen hat wiederum ein erhebliches Kostensenkungspotential zur Folge.

Aktuell existieren multiple Ansätze zur Reduzierung von Emissionen und Reststoffen für unterschiedlichste Industrieanwendungen. Pasckert [21] sieht in der Schließung von Stoffkreisläufen ein erhebliches Optimierungspotenzial. Ein Kreislauf zeichnet sich bereits dadurch aus, dass sich ein Objekt entlang der Wertschöpfungskette als Input eines weiteren Prozesses eignet. Eine Trennung von Reststoffen wird umso schwieriger, je mehr Stoffe miteinander verbunden sind und der Anteil der Verunreinigungen steigt. Die Sortenreinheit

---

der Stoffströme steht somit an erster Stelle bei einer Schließung von Stoffkreisläufen und der Wiederverwertung<sup>2</sup> von Produkten. Um Reststoffe als Sekundärrohstoffe nutzen zu können, ist die Sortenreinheit die entscheidende technisch-ökonomische Ausgangsvoraussetzung [22]. Somit ist die Wertschöpfung umso größer, je enger Stoffkreisläufe geschlossen werden. Die Entwicklung konsistenter Produkte, welche die oben genannten Anforderungen erfüllen, steht im Mittelpunkt der zukünftigen Forschung und Entwicklung. Zur unternehmerischen Gewinnsteigerung bietet sich neben einer gänzlichen Vermeidung von Reststoffen auch die Umwandlung von unerwünschten und teils gesundheitsschädlichen Nebenprodukten in wertvolle Co-Produkte an [23]. Um die bestehende Reststoffproblematik und damit verbundene Umweltprobleme lösen zu können, schlägt von Weizsäcker eine Erhöhung der Stoffproduktivität um den Faktor fünf vor. Laut von Weizsäcker ermöglicht die Verwendung rezyklierter Stoffe in der Papierindustrie eine Energieeinsparung von bis zu 64 % im Vergleich zum Einsatz von Primärrohstoffen [24]. Die Rezyklierbarkeit von Papier ist jedoch nur in einem begrenzten Umfang möglich, was jedoch dem Faktor fünf der Materialproduktivität nicht schadet.

Diese Theorie wird auch durch das von Friedrich Schmidt-Bleek entwickelte Materialintensität-pro-Service-Einheit (MIPS)-Konzept bestätigt. Dieses definiert die Stoffproduktivität, also wie viele Tonnen an Stoff bewegt werden müssen, und umfasst den Produktzyklus „von der Wiege bis zur Bahre“ (from cradle to grave) [23].

---

#### **4.4.1.1 Material-Intensity per Service-Unit (MIPS)**

---

Das MIPS-Konzept, welches die Material-Intensität pro Serviceeinheit darstellt und eng mit dem Konzept der Ressourcenproduktivität verknüpft ist, geht auf Friedrich Schmidt-Bleek zurück. Das Konzept stellt den Grad der Umweltbelastung eines Produktes über das gesamte Produktleben dar, also den Material- und Energiebedarf von der Wiege bis zur Bahre [16].

Die MIPS ist lediglich für „dienstleistungsfähige Endprodukte“ definiert und schließt daher Rohmaterialien und Hilfsstoffe aus.

---

<sup>2</sup> umwandelnde Wiederaufbereitung von Altprodukten unter Auflösung und Veränderung der Produktgestalt, um die Werkstoffe zurückzugewinnen

---

Wesentliche Vorteile des MIPS-Ansatzes sind:

- Material- und Energieaufwand werden in den gleichen Einheiten verrechnet,
- das Konzept kann zum Aufstellen von Ökobilanzen angewendet werden,
- einfach und leicht verständlich.

---

#### **4.4.1.2 Ressourcenproduktivität**

---

Die Summe aller „verfügbaren Einheiten an Dienstleistung, dividiert durch den Gesamtverbrauch an Energie und Material für das dienstleistende Gut“ beschreibt die Ressourcenproduktivität [16]. Sie umfasst alle Stoffströme von der Wiege bis zur Bahre und stellt die Inverse der Material-Intensität pro Service-Einheit (MIPS) dar. Die Ressourcenproduktivität wird in der Einheit  $\text{kg}^{-1}$  gemessen. Die Ressourcenproduktivität wird oftmals synonym mit der Ökoeffizienz eines Produktes verwendet.

Bereits 1995 postulierte Ernst Ulrich von Weizsäcker eine Vervielfachung der Ressourcenproduktivität um den Faktor vier. Diese Faktor-4-Strategie bezeichnet entweder eine Vervierfachung der Wohlstandserhöhung bei gleichbleibendem Materialeinsatz oder aber, eine Verdopplung des Wohlstands bei simultaner Halbierung des Naturverbrauchs [23]. Um eine Entlastung der Umwelt voranzutreiben, ist es erforderlich, dass die Ressourcenproduktivität schneller wächst als die Wirtschaft [5]. Im Jahr 2010 erhöhte Ernst Ulrich von Weizsäcker seine Theorie zur Ressourcenproduktivität auf den Faktor fünf [24].

Müller-Christ sieht in der Erhöhung der Ressourcenproduktivität einen Prozess, der keiner speziellen Förderung bedarf, da der effiziente Umgang mit Ressourcen eine grundlegende betriebswirtschaftliche Maxime eines Unternehmens darstellt [25]. Vielmehr liegt der Fokus der Wirtschaftsökonomie auf der Reproduktion der Ressourcen. Die Wirtschaftsökonomie befasst sich in diesem Zusammenhang sowohl mit der Ressource als auch mit der Reproduktion von materiellen und immateriellen Ressourcen.

---

#### **4.4.2 Lebenszyklusanalyse und Ökobilanzierung**

---

Die Lebenszyklusanalyse, welche auch unter dem Begriff der Ökobilanzierung bekannt ist, beurteilt die Umwelt- und Sozialverträglichkeit eines technischen Produktes über seinen gesamten Lebenszyklus – Herstellung, Nutzung und Entsorgung – hinweg sowie die damit verbundenen vor- und nachgeschalteten Prozesse wie die Herstellung von Hilfs- und Betriebsstoffen. Es werden die entsprechenden Energie- und Materialaufwände betrachtet und bewertet.

Die Grundlagen für eine Ökobilanzierung sind in DIN EN ISO 14040 und in DIN EN ISO 14044 festgehalten. Die Erstellung einer Ökobilanz ermöglicht einen Vergleich diverser Prozesse und erlaubt die Identifizierung einer ökologisch optimalen Produktionslösung. Ökobilanzen stellen dabei lediglich eine relative Bewertung der Umweltverträglichkeit dar [17].

Die Ökobilanz nach Norm besteht aus vier aufeinander folgenden Phasen:

- Festlegung des Ziels und des Untersuchungsrahmens,
- Sachbilanz,
- Wirkungsabschätzung und
- Auswertung.

---

#### **4.5 Rolle des Unternehmens bei der Umsetzung von Nachhaltigkeit**

---

Zu den dringlichsten Umweltproblemen des 21. Jahrhunderts zählen neben dem steigenden Energiekonsum auch der Transport und die Förderung von Stoffströmen sowie die Intensität der Landnutzung [5].

Grunwald und Kopfmüller sehen in Innovation und Technik ein ambivalentes Verhältnis zur nachhaltigen Entwicklung. Technologischer Fortschritt gilt als Verursacher vieler Nachhaltigkeitsprobleme, gleichzeitig zielt ein technischer Fortschritt auf die Lösung von Nachhaltigkeitsproblemen ab. Die Lösung für dieses ambivalente Problem liegt in der Beantwortung der Frage, wie wissenschaftlich-technischer Fortschritt gestaltet werden muss, damit positive Beiträge zur nachhaltigen Entwicklung die Folge sind [18, 26].

---

Zu einer nachhaltigen Entwicklung hat zudem auch der Übergang von der Produktionsverantwortung zur Produktverantwortung beigetragen. Die Betrachtung der Nachhaltigkeit eines Produktes endet nicht am Werkstor, sondern fördert die Beachtung der ökologischen Verträglichkeit bereits bei der Produktentwicklung und darüber hinaus auch bei der Verwendung und Entsorgung. Diese Bewertung über den Grad der Nachhaltigkeit eines Produktes wird anhand der Ökobilanz oder des Life Cycle Analysis (LCA) durchgeführt [26]. Die Einführung von neuer Technik erfordert stets auch eine Anpassung des Nutzerverhaltens. So ist beispielsweise für eine Nutzung von Technik im Sinne des Nachhaltigkeitsbegriffes, eine entsprechende Anpassung des Produktentwicklungs- und Produktherstellungsprozesses nötig sowie eine Veränderung im Nutzungsverhalten seitens der Konsumenten [26].

Die Konsumenten spielen für die Aufrechterhaltung der Kreislaufwirtschaft eine nicht zu vernachlässigende Rolle. Lediglich durch ein möglichst sortenreines Recycling von Wertstoffen können Materialkreisläufe bzw. die Kreislaufwirtschaft langfristig aufrechterhalten werden. Für eine nachhaltige Unternehmensgestaltung kommen zudem der verantwortungsvollere Einsatz von Materialien sowie die Verlängerung der Produktlebensdauer in Betracht.

---

#### **4.6 Nachhaltigkeit in der Papierindustrie**

---

Für die Papierindustrie spielt der Nachhaltigkeitsbegriff bislang eine untergeordnete Rolle. Gleichwohl zeigt sich am zunehmenden Bedarf an Zertifikaten und Umweltzeichen ein steigendes Interesse der Endkunden an nachhaltig hergestellten Papier- und Verpackungsprodukten. Der Blaue Engel zählt laut einer gemeinsam durchgeführten Studie von A.T. Kearney und der Initiative Pro Recycling (IPR) aus dem Jahr 2010 zu den bekanntesten Labeln und wird von den Befragten mit den höchsten Umweltstandards in Verbindung gebracht. In den letzten Jahren haben sich zunehmend auch Footprints und Nachhaltigkeitsberichte in der papierherstellenden und -verarbeitenden Industrie etabliert [27].

Die Papierindustrie zählt zu den besonders energie- und rohstoffintensiven Branchen. Somit stellt der verantwortungsvolle Umgang mit Rohstoffen, Energie und Wasser, welcher sich direkt in Kosten umrechnen lässt, den zentralen Leitgedanken der



---

Industrieunternehmen dar. Eine zunehmende Kreislaufführung des Prozesswassers oder der steigende Einsatz von Recyclingpapier entsprechen beispielsweise diesem Nachhaltigkeitsgedanken. Die Kreislaufführung der Prozesswässer birgt jedoch die Gefahr, dass sich Füllstoffe und Mikrostickies im Prozess anreichern.

In **Abbildung 3** ist der Trend der spezifischen Abwassermenge in l pro kg Papier seit 1972 dargestellt.

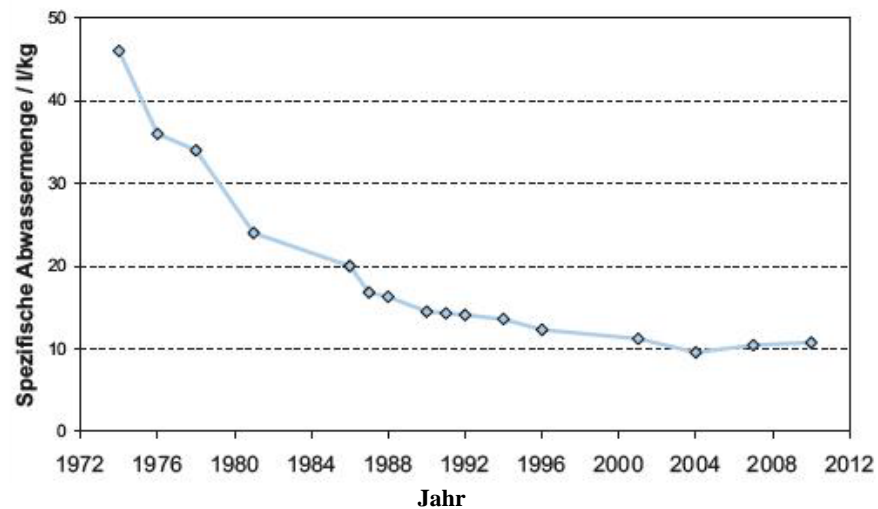


Abbildung 3 Abwasseraufkommen in der deutschen Papier- und Zellstoffindustrie [28]

Seit der Jahrtausendwende hat sich keine signifikante Einsparung ergeben und die spezifische Abwassermenge im Durchschnitt der gesamten deutschen Papierproduktion hat sich bei etwa 10 l/kg eingependelt. Die Altpapier verarbeitenden Betriebe können einen geringeren Wert von etwa 5 l/kg vorweisen [29-31].

Bei der Darstellung des Energiebedarfs pro Tonne Papier zeigt sich ein ähnliches Bild. Die Entwicklung der Energieeffizienz geht aus **Abbildung 4** hervor.

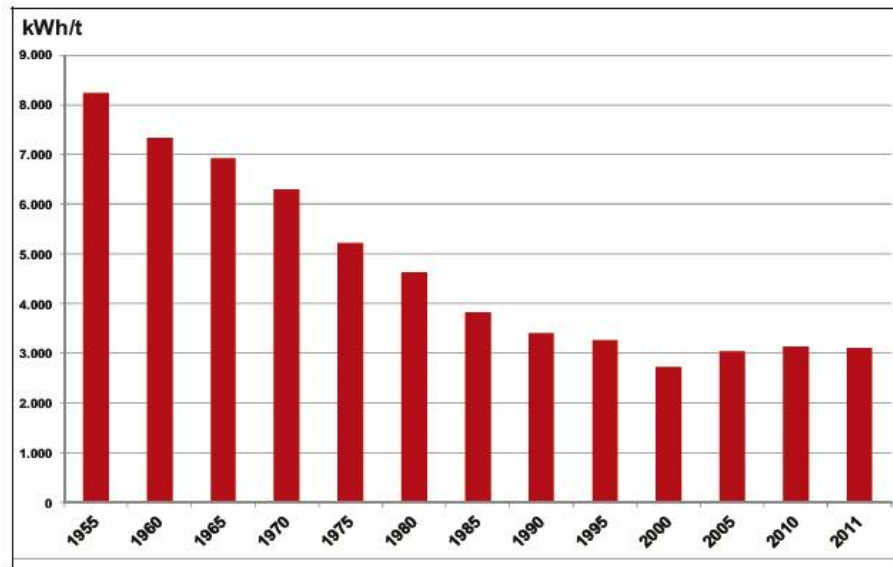


Abbildung 4 Entwicklung der Energieeffizienz in der deutschen Papier- und Zellstoffindustrie [32]

Durch Optimierungen in den Kraftwerken und Optimierungen in den Altpapieraufbereitungs- und in den Papiererzeugungsprozessen haben sich in den vergangenen Jahren Einsparungen erzielen lassen. Auch eine veränderte Rohstoffstruktur (verstärkter Altpapiereinsatz und steigender Füllstoff- und Pigmenteinsatz bei grafischen Papieren) ermöglicht Verringerungen des spezifischen Energieeinsatzes. Eine weitere Reduzierung des spezifischen Energiebedarfes ist möglich. Demel, Balzer et al. nennen Stromeinsparpotenziale von bis zu 16 % und Dampfeinsparpotenziale von bis zu 25 % [30, 33, 32, 34].

Neben den beiden größten Posten Energie- und Wasserbedarf, zählen auch die Verwertung und Entsorgung von Rückständen, welche bei der Altpapieraufbereitung anfallen, zu den optimierbaren Nachhaltigkeitsindikatoren. In den vergangenen Jahren ist die absolute Menge an Rückständen, bedingt durch steigende Produktionsmengen, stetig gestiegen. Die Verwertung der Rückstände erfolgt nahezu vollständig stofflich und energetisch. Durch die Umsetzung neuer gesetzlicher Grundlagen ist die Deponierung von Faserabfällen und Deinkingschlämmen in Deutschland bedeutungslos geworden [30, 35].

Im Rahmen des EU-Projektes REFFIBRE werden Lösungen mit höherer Wertschöpfung in Betracht gezogen und ihr Einfluss auf eine nachhaltige Papierherstellung und die damit verbundenen Stoffaufbereitungsprozesse untersucht.

---

## 5 Stand des Wissens – Altpapieraufbereitung

---

Für die deutsche und europäische Papierindustrie stellt Altpapier den mengenmäßig bedeutendsten Faserstoff dar. Im Jahr 2013 wurden in Europa 71,7 % des erzeugten Papiers dem Recycling zugeführt. Ein Anteil von etwa 21 % des erzeugten Papiers eignet sich nicht für das Recycling. Es handelt sich dabei im Wesentlichen um Hygienepapiere oder Papiere, die während ihrer Anwendung kontaminiert oder zerstört werden [36].

Die Aufbereitung von Altpapier zur Herstellung neuen Faserstoffes dient der Entfernung von Störstoffen bei zeitgleicher Gewinnung von verwertbaren Faserstoffen [37].

Im Rahmen dieser Arbeit sollen die drei Prozesse der Altpapieraufbereitung – Sortierung, Flotation und Dispergierung - untersucht werden. Die Theorie zu den genannten Prozessen wird in den nachfolgenden Kapiteln genauer erläutert.

---

### 5.1 Feinsortierung

---

Die Feinsortierung ist ein nach der Vorflotation im Stoffaufbereitungsprozess angeordnetes mechanisches Trennverfahren, dessen Ziel die Ausschleusung von störenden Verunreinigungen, hauptsächlich Stickies und zerkleinerten Kunststoffbestandteilen, aus dem Altpapieraufbereitungsprozess ist. Für die Herstellung von Papier spielt insbesondere die Entfernung von Stickies aus dem Prozess die größte Rolle. Diese verursachen klebrige Ablagerungen in den Maschinen welche vorrangig in der Trockenpartie für Abrisse sorgen. Des Weiteren sind Löcher im Papier häufig auf Stickies zurückzuführen [38].

Zu den Trennprozessen werden neben der Klassierung<sup>3</sup> bzw. der Fraktionierung<sup>4</sup> von Faserstoffen in Drucksortierern auch die in Zentrifugalsortierern (Hydrozyklone und Cleaner), ablaufenden Sortier-Prozesse<sup>5</sup> gezählt. Für diese Arbeit ist lediglich die Aufbereitung von Faserstoffen mit Hilfe von Drucksortierern relevant. Die Drucksortierung wird in den folgenden Kapiteln ausführlicher erläutert.

---

<sup>3</sup> Trennung nach geometrischer Form und Größe

<sup>4</sup> Trennung von Fasern nach unterschiedlichen Faserlängen

<sup>5</sup> Sortierung = Trennung nach physikalischen Merkmalen (Dichte, Benetzbarkeit...)

---

### **5.1.1 Drucksortierung**

---

Die Abtrennung von Verunreinigungen aus Suspensionen und die Fraktionierung von Faserstoffen mit Hilfe von Drucksortierern zählen zu den heute üblichen Aufbereitungsverfahren von Altpapier in Papierfabriken. Das Abtrennen von Verunreinigungen aus der Suspension beschreibt dabei einen Sortierprozess, welcher idealerweise ohne größere Faserverluste geschieht. Die Fraktionierung von Faserstoffen erfolgt wiederum unter gezielter Abtrennung von Teilströmen, um beispielsweise eine Faserfraktion anhand von qualitativen Merkmalen, wie Faserlänge, Coarseness oder spezifischer Oberfläche aus der Suspension heraus zu schleusen, die für die Papierherstellung eine untergeordnete Rolle spielen [39, 40]. Diese ausgeschleusten Fraktionen stellen jedoch keinen Verlust im eigentlichen Sinne dar, da sie für andere Zwecke eingesetzt werden.

In den nachfolgenden Unterkapiteln soll zunächst der Aufbau eines Drucksortierers beschrieben werden. Anschließend sollen die Parameter genauer erläutert werden, welche einen Einfluss auf das Sortierergebnis haben. Den Abschluss dieses Kapitels bildet eine Zusammenfassung der mathematischen Grundlagen zur Beschreibung des Sortiervorganges. Die mathematische Beschreibung wird im weiteren Verlauf dieser Arbeit für die Modellierung des Sortiervorganges eine wichtige Rolle spielen.

---

### 5.1.1.1 Aufbau eines Drucksortierers

---

In **Abbildung 5** ist der Aufbau eines aktuellen Drucksortierers dargestellt. Die Zuführung der Stoffsuspension in den Drucksortierer kann entweder axial oder tangential erfolgen. Die tangentiale Zuführung erfolgt, im Gegensatz zu der in Abbildung 5 dargestellten axialen Zufuhr der Stoffsuspension, tangential im oberen oder unteren Gehäusebereich des Drucksortierers. Der zugeführte Stoffstrom wird mit der Bezeichnung Feed F gekennzeichnet

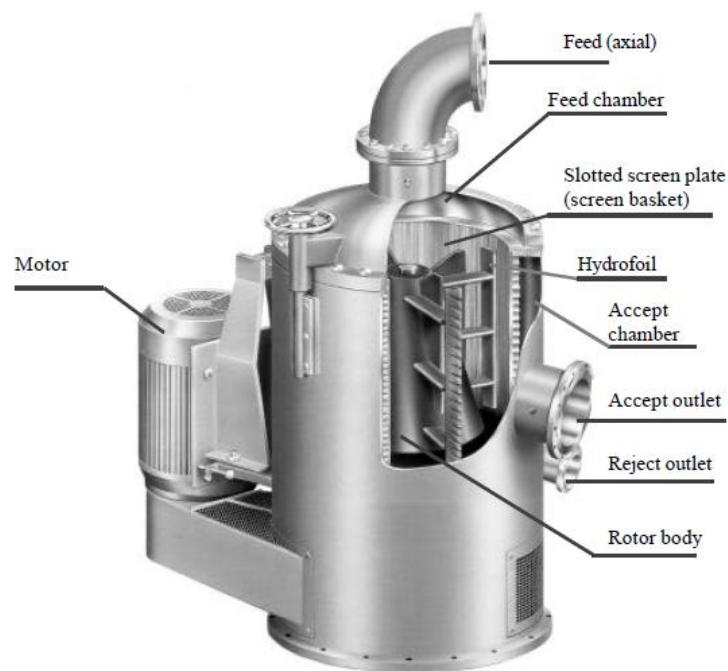


Abbildung 5 Aufbau eines Drucksortierers [41]

Die Stoffdichte der aufgegebenen Faserstoffsuspension beträgt in Abhängigkeit vom Aufbau des Drucksortierers zwischen 0,3 % und 4,5 %. Im Inneren eines Drucksortierers befindet sich ein Siebkorb, der als Trennelement für die Faserstoffsuspension fungiert. Der Anteil der einströmenden Faserstoffsuspension, der durch den Siebkorb hindurchtritt, wird als Durchlauf D oder Accept A bezeichnet. Der Durchfluss der Stoffsuspension durch den Siebkorb kann entweder von innen nach außen (zentrifugal) oder umgekehrt (zentripetal) erfolgen.

Störstoffe, welche nicht die geometrischen Trennbedingungen am Siebkorb erfüllen, treten nicht durch die Siebkorboberfläche hindurch und werden als Überlauf Ü oder Rejekt R bezeichnet und bleiben auf der zulaufseitigen Siebseite zurück [19].

Siebkörbe werden anhand der Form ihrer Öffnungen in Loch- und Schlitzsiebkörbe eingeteilt. Allgemein lässt sich festhalten, dass zur Entfernung flächiger Verunreinigungen, wie beispielsweise Folienstücke oder Stippen, Lochsiebkörbe besser geeignet sind. Die Vorteile der Schlitzsiebkörbe liegen in der Entfernung von kubischen Verunreinigungen, wie Styropor-Teilchen oder Hotmelt-Klebern [19]. Des Weiteren hat auch die Geometrie der Siebkorboberfläche einen Einfluss auf das Trennergebnis und wird daher in profilierte und nicht profilierte (glatte) Oberflächen unterschieden. In **Abbildung 6** sind heute übliche Siebkorbprofile dargestellt.

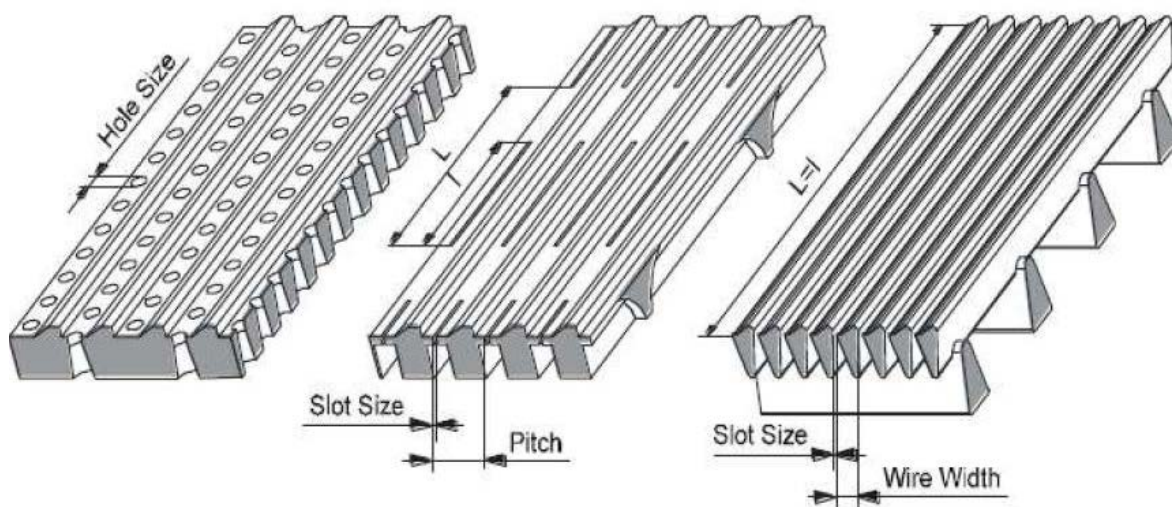


Abbildung 6 Siebkorbprofile [42]

Heutzutage in der Feinsortierung im Einsatz befindliche Siebkörbe sind überwiegend Schlitzsortierer mit Schlitzweiten bis hinunter zu 0,1 mm. Die Oberflächen von Schlitzsiebkörben sind nahezu immer profiliert, da dies eine Kapazitätserhöhung im Vergleich zu glatten Oberflächen mit sich bringt. Durch ein hohes Profil wird eine Turbulenzerhöhung an der Oberfläche ermöglicht, wodurch jedoch das Sortiерergebnis herabgesetzt wird.

Zusätzlich zu den durch Profilierungen erzeugten Turbulenzen werden zur Freihaltung des Siebkorbes unterschiedlichste Rotor-Bauarten eingesetzt. Die Anordnung der Rotoren kann sowohl zulauf- als auch durchlaufseitig erfolgen. Diese Rotoren werden in geringem Abstand zur Siebkorbzylinderoberfläche an dieser vorbei bewegt.

---

Den Rotoren ist gemeinsam, dass sie die Siebkorbbooberfläche durch Druckpulsationen freihalten, indem sie kleine Teilchen durch das Sieb hindurch in Durchlaufrichtung beschleunigen. Die heute üblichen Bauformen für Drucksortierer sind in **Abbildung 7** dargestellt.

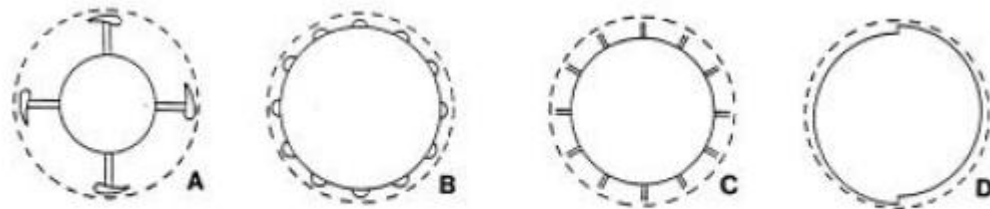


Abbildung 7 Rotorbauformen für Drucksortierer (A- Foilrotor, B- Bumprotor, C- radiale Leitschaufeln, D-.Stufenrotor) [43]

Am Effizientesten arbeitet der Foilrotor, welcher in Abbildung 7A abgebildet ist. Dieser stellt zugleich die am häufigsten eingesetzte Bauform von Rotoren dar. Foilrotoren besitzen eine ähnliche Geometrie wie ein Tragflügel und sind gegenüber der Zylinderwand um einen bestimmten Winkel angestellt, um einen klaren Druckpuls mit hohen Amplituden und niedriger Frequenz zu erzeugen [44, 19].

---

#### 5.1.1.2 Einflussparameter für den Sortiervorgang

---

Jokinen hat in ihrer Dissertation Parameter zusammengetragen, die den Prozess im Drucksortierer beeinflussen. Über den Erfolg eines Sortierprozesses entscheiden diverse Design-, Betriebs- und Faserqualitätsparameter [40]. Laut Jokinen wurden bereits umfangreiche Untersuchungen zu Design- und Betriebsparametern von Drucksortierern in Wissenschaft und Forschung vorangetrieben und auch deren Einfluss auf die Kapazität und Selektivität von Sortierprozessen ausgewiesen. Bei der Untersuchung von Sortierprozessen ist eine simultane Betrachtung von Kapazität und Selektivität unerlässlich, da die Parameter durch diverse Interdependenzen verknüpft sind.

Diese Interdependenzen sollen im Rahmen des REFFIBRE-Projektes in einem Modell herausgearbeitet und abgebildet werden. Zudem wird während des Projektes auch der Einfluss der Veränderung von Design- und Betriebsparametern auf Faser- und

Papierqualitätsparameter abgebildet. Dies ist jedoch nicht Teil dieser Arbeit. Zur Modellierung von Sortiersystemen ist die Betrachtung grundsätzlich auf eine Einzelmaschine zurückzuführen [38, 45]. Für die Einzelmaschine spielen laut Bos et al. [38] neben der Konstruktion des Sortierers, des Rotors und des Siebes auch die Betriebsparameter und die Stoffeigenschaften eine Rolle. In der nachfolgenden **Tabelle 1** sind die von Jokinen zusammengetragenen Parameter aufgeführt, welche einen Einfluss auf Kapazität und Selektivität des Sortiervorganges aufweisen. Diese Tabelle erhebt keinen Anspruch auf Vollständigkeit, sondern stellt die von Jokinen ermittelten Einfluss-Parameter in verkürzter Form dar [46]. Die Design-Parameter der einzelnen Sortieraggregate in Anlage A und Anlage B sind bekannt, werden allerdings in dieser Arbeit nicht betrachtet. Der Fokus liegt auf der Modellierung der Zusammenhänge zwischen Betriebs- und Faserqualitätsparametern.

Tabelle 1 Zusammenfassung der Auswirkungen von Design-, Betriebs- und Faserqualitätsparametern auf Kapazität und Selektivität von Drucksortierern [46]

Erhöhung des Design-Parameters	Einfluss auf die Kapazität	Einfluss auf die Selektivität
Effekte des Rotor-Designs		
Anstellwinkel	↑↑	↓
Foil-Breite	↑	↓
Effekte des Siebkorb-Designs		
Schlitzweite	↑	↓
Stegbreite	↑↓	↑↓
Schlitzabstand	↑↓	
Profilhöhe	↑	↓
Profildesign	-	-
Höhe der Stege	↓	↑
Erhöhung des Betriebs-Parameters		
Siebdurchtrittsgeschwindigkeiten	↑	↓
Foil Spitzengeschwindigkeit	↑↓	↑↓
Verdünnungswasser	↓	↓
RR <sub>v</sub>	↑	↓
Stoffdichte	↓	↑
Temperatur	↑	↓
Erhöhung des Faserqualitäts-Parameters		
CSF	↓	
Coarseness	↓	
Faserlänge	↓	↓
Faserdurchmesser	↓	
Faser-Flexibilität (Langfaser)	↑	
Faser-Flexibilität (allgemein)	↑	



---

Anhand der Tabelle ist erkennbar, wie groß die Zahl der Parameter ist, die einen Einfluss auf den Erfolg eines Sortiervorganges ausübt. Die wohl wichtigsten und gleichzeitig mit wenig Aufwand ermittelbaren Parameter zur Beeinflussung des Sortierergebnisses in Drucksortierern sind die Rejektraten (volumen- und massenbezogen), das Druckgefälle im Drucksortierer sowie die Stoffdichten von Zulauf, Durchlauf und Überlauf. Bei einem stark verschmutzten Stoff im Zulauf sollte die Rejektmenge letztendlich umso größer sein. Die Stoffdichte des Zulaufs ist ebenfalls ausschlaggebend für die Kapazität des Sortierers. Durch ein größeres Druckgefälle erhöht sich wiederum die Kapazität des Drucksortierers. Bei einer solchen Steigerung der Kapazität steigen jedoch auch die Verstopfungsgefahr des Siebkorbes und die Gefahr der Zerkleinerung von Stickies.

---

#### 5.1.1.3 Mathematische Beschreibung der Sortierung

---

Zur mathematischen Beschreibung der Drucksortierung werden zwei unterschiedliche Prinzipien herangezogen. Bei einer *Sperrsortierung* werden sämtliche Teile, die größer als die Öffnungen des Siebkorbes sind, zurückgehalten. Bei der *Wahrscheinlichkeitssortierung* wird die Wahrscheinlichkeit, dass ein Partikel den Siebkorb durchdringt, von mehreren Parametern abhängig gemacht. Eine Reihe dieser Parameter wurde bereits in Kapitel 5.1.1.2 vorgestellt. Die wichtigsten Parameter sind neben den geometrischen Abmessungen der Teilchen auch die Deformierbarkeit der Partikel.

Für die Abtrennung von Feinstoffen und Füllstoffen tritt laut Ämmälä eine Kombination von Wahrscheinlichkeits- und Sperrsortierung auf. Fein- und Füllstoffe weisen daher in Drucksortierern ein ähnliches Verhalten wie Wasser und teilen sich entsprechend der volumenbezogenen Rejektrate auf. Bei Faserstoffen, Stickies und Kunststoffbestandteilen gelten hingegen die Vorschriften der Wahrscheinlichkeitssortierung. Diese verhalten sich entsprechend der Massen-Rejektrate [43].

Die ersten Ansätze zur mathematischen Beschreibung von Drucksortierern und den darin ablaufenden Prozessen gehen auf die 1950er Jahre zurück. Kubát und Steenberg entwickelten zur Beschreibung des Verhaltens von Fasersuspensionen in Drucksortierern zwei Modelle, welche auch heute noch ihre Gültigkeit haben: Das *Pfropfenströmungsmodell* und das Modell der *idealen Durchmischung*.

Um die Kapazität eines Drucksortierers bestimmen zu können, ist die Erfassung zweier Größen nötig. Der Volumenstrom  $\dot{V}$ , zumeist gemessen in l/min, multipliziert mit der Stoffdichte  $c$ , gemessen in kg/l, ergibt den Massenstrom  $\dot{m}$ . Der Index  $X$  ist an dieser Stelle als Platzhalter für die Indizes F für den Feedstrom, A für den Acceptstrom und R für den Rejektstrom gewählt. Die Kapazität eines Drucksortierers bezeichnet stets den Accept-Massenstrom.

$$\dot{m}_X = \dot{V}_X * c_X \quad (1)$$

Zur Einstellung von Drucksortierern werden im Wesentlichen die beiden charakteristischen Größen, massenbezogene Rejektrate  $RR_m$  und volumenbezogene Rejektrate  $RR_v$ , herangezogen. Diese definieren sich wie folgt:

$$RR_v = \frac{\dot{V}_R}{\dot{V}_F} \quad (2)$$

$$RR_m = \frac{c_R * \dot{V}_R}{c_F * \dot{V}_F} = \frac{\dot{m}_R}{\dot{m}_F} \quad (3)$$

Der Trenngrad gibt hingegen einen Hinweis auf die Selektivität eines Drucksortierers. Sie erlaubt eine prozentuale Angabe über den Anteil einer entfernten Komponente und wird insbesondere zur Beschreibung der Stickyentfrachtung, aber auch zur Beschreibung des Faserverhaltens im Drucksortierer, herangezogen.

$$E_R = \frac{\dot{V}_R * c_R * w_{i,R}}{\dot{V}_F * c_F * w_{i,F}} * 100 \% = \frac{\dot{m}_R * w_{i,R}}{\dot{m}_F * w_{i,F}} = RR_m * \frac{w_{i,R}}{w_{i,F}} * 100 \% \quad (4)$$

$w_{i,R}$  stellt den Gewichtsanteil einer Fraktion im Rejekt dar, während  $w_{i,F}$  den Gewichtsanteil der jeweiligen Fraktion im Feed wiedergibt. Alle weiteren Größen in der Gleichung wurden bereits vorgestellt.

Nachteilig wirkt sich jedoch aus, dass der Trenngrad lediglich auf eine Komponente der Stoffsuspension beschränkt ist und keine Aussage über die den Siebkorb passierenden Komponenten zulässt [46].

Im Jahr 1981 wurde aus diesem Grund durch Nelson der sog. Q-Index eingeführt, um die Selektivität eines Trennprozesses in einem Drucksortierers zu ermitteln. Der Q-Index ist nicht von der Rejektrate abhängig und ermöglicht eine zeitgleiche Betrachtung von Accept und Rejekt. Der Q-Index wurde aus dem Modell der idealen Durchmischung entwickelt. Es lassen sich entweder Anteile  $w_X$  der Suspensionen in Accept und Rejekt vergleichen oder aber Stoffeigenschaften  $Y_X$ . Durch die Einführung des Q-Index ist ein Vergleich verschiedener Drucksortierer möglich. Zudem kann auch ein Vergleich zwischen Siebkörben oder Rotoren ein- und desselben Sortierers erfolgen.

$$Q_{i,N} = 1 - \frac{w_{i,A}}{w_{i,R}} \quad (5)$$

$$Q_K = 1 - \frac{Y_I}{Y_{II}} \quad 0 < Q_K < 1 \quad (6)$$

$Q_N$  bezeichnet den Q-Index nach Nelson,  $Q_K$  den Q-Index nach Karnis.  $w_A$  und  $w_R$  beschreiben den Gewichtsanteil einer bestimmten Komponente in der Stoffsuspension von Accept und Rejekt in %. Ein Q-Index von eins deutet auf eine Anreicherung einer Stoffkomponente im Rejektstrom hin, während ein Q-Index von Null bedeutet, dass keine Sortierwirkung eintritt.  $Y_I$  und  $Y_{II}$  stehen hingegen für definierte Qualitätseigenschaften, wie beispielsweise Faserlänge oder Schopper-Riegler-Wert. I und II stellen die Indizes für Accept und Rejekt dar, die derart gewählt werden müssen, dass Fraktion I den kleineren Zahlenwert annimmt, da der Fraktionierungsindex Q sonst negative Werte annimmt.

Um die Gleichungen 3 und 5 zu verknüpfen, wird folgende Gleichung für die Trennrate/Sortiereffizienz herangezogen. Die darin enthaltenen Parameter sind bereits aus den vorangehenden Ausführungen bekannt. Die Trennrate  $E_{i,R}$  ist dabei der Anteil der Ausgangsmenge der Fraktion i, der ins Rejekt überführt wird.

$$E_{i,R} = \frac{RR_m}{1 - Q_{i,N} + Q_{i,N} * RR_m} \quad (7)$$

Auf Kubát und Steenberg geht eine Gleichung zurück anhand welcher sich der Trenngrad  $E_R$  auf nur eine Variable zurückführen lässt. Diese Gleichung wurde aus dem Pfropfenströmungsmodell entwickelt.

$$E_R = RR_m^\alpha \quad (8)$$

Je stärker sich die maschinenspezifische Sortierkonstante  $\alpha$  von 1 unterscheidet, desto besser die Sortierwirkung.

Eine weitere Möglichkeit, um Aussagen über die Selektivität eines Drucksortierers treffen zu können, ist die Ermittlung des Wirkungsgrades  $\eta$  (engl. „*cleanliness efficiency*“, „*screening efficiency*“ oder „*separation efficiency*“). Dieser zeichnet sich dadurch aus, dass er ähnlich wie der von Nelson entwickelte Q-Index unabhängig von der Bestimmung der Massen-Rejektrate  $RR_m$  ist. Wie zuvor wird jedoch erneut lediglich eine Komponente betrachtet, in diesem Fall das Accept. Der Wirkungsgrad berechnet sich wie folgt:

$$\eta = \frac{w_{i,F} - w_{i,A}}{w_{i,F}} * 100 \% \quad (9)$$

Aufgrund des unterschiedlichen Verhaltens von Wasser und Feststoffen in Drucksortierern, kommt es in den Sortierern zu einer Eindickung der Rejekte. Die Eindickrate RTF ergibt sich aus der Division der Stoffdichten von Rejekt und Feed. Sie lässt sich auch als das Verhältnis von massen- zu volumenbezogener Rejektrate definieren.

$$RTF = \frac{c_R}{c_F} = \frac{RR_m}{RR_V} \quad (10)$$

Es lässt sich festhalten, dass mit einer Erhöhung der Eindickrate RTF eine Verringerung der Kapazität und eine Erhöhung der Selektivität einhergehen. Um über die Eindickrate direkte Vergleiche zwischen mehreren Sortieraggregaten ziehen zu können, müssen die volumenbezogenen Rejektraten zwischen den einzelnen Testpunkten übereinstimmen.

Eine Größe, die nicht durch eine konstante volumenbezogene Rejektrate eingeschränkt wird, um mehrere Sortieraggregate zu vergleichen, ist das Durchtrittsverhältnis („*pulp passage ratio*“). Das Durchtrittsverhältnis berechnet sich nach folgender Formel:

$$P_P = \frac{c_A}{c_F} = \frac{\log RR_m}{\log RR_V} \quad 0 < P_P < 1 \quad (11)$$

Der Siebdurchtritt der einzelnen Haindl-McNett-Fractionen lässt sich unter Vernachlässigung der Wechselwirkungen zwischen den Fractionen ermitteln zu:

$$P_{P,i} = \frac{\log RR_m + \log\left(\frac{w_{i,R}}{w_{i,F}}\right)}{\log RR_V} \quad (12)$$

$P_{P,i}$  steht für den Durchtritt einer einzelnen Fraction,  $w_{i,R}$  stellt den Gewichtsanteil einer Fraction im Rejekt dar, während  $w_{i,F}$  den Gewichtsanteil der jeweiligen Fraction im Feed wiedergibt.

Der Zusammenhang zwischen Durchtrittsverhältnis und Eindickrate wird durch Gleichung 13 abgebildet. Diese Gleichung gilt für das Pfropfenströmungsmodell.

$$RTF = \frac{RR_m}{RR_V} = RR_V^{P_P - 1} \quad (13)$$

Um letztendlich die Wirksamkeit eines Sortieraggregates beurteilen zu können, wird die Ausbeute von (Lang-) Fasern im Accept herangezogen. Im Gegensatz dazu kennzeichnet der Anteil an (Lang-) Fasern im Rejekt die Verluste.

Zur Ermittlung der Ausbeute wird folgende Formel genutzt:

$$\text{Ausbeute } A = \frac{\dot{m}_{i,out}}{\dot{m}_{i,F}} = \frac{\dot{V}_{out} * c_{out} * w_{i,out}}{\dot{V}_F * c_F * w_{i,F}} \quad (14)$$

Der Index „i“ steht in dieser Formel stellvertretend für die Fraktionen R 30, R 50, R 100 und R 200 bzw. D 200. „w“ bezeichnet den Massenanteil der Fraktion, während der Index „out“ sowohl für Accept und Rejekt verwendet werden kann.

Da im Rahmen des REFFIBRE-Projektes auch die gezielte Entfernung einer Faserkomponente aus dem Stoffstrom in Betracht gezogen wird, wird an dieser Stelle bereits auf die Wichtigkeit des von Olson entwickelten Fraktionierungsindizes  $\Phi$  hingewiesen. Dieser geht aus Formel 15 hervor.

$$\Phi = A_{R,Langfaser} - A_{R,Kurzfaser} \quad (15)$$

Wenn die Langfasern als gleichwertig zu der Haindl-McNett R 30-Fraktion<sup>6</sup> und die kurzen Fasern als der Siebdurchtritt D 30-Fraktion<sup>7</sup> definiert werden, dann ergibt sich der Fraktionierungsindex zu:

$$\Phi = RR_m * \left( \frac{w_{R30,R}}{w_{R30,F}} - \frac{w_{D30,R}}{w_{D30,F}} \right) \quad (16)$$

---

## 5.2 Druckfarbenflotation

---

Die Druckfarbenflotation ist fester Bestandteil der Aufbereitung von Altpapier und dient der Entfernung der Druckfarbe und der Ausschleusung von Füllstoffen und Schmutzpartikeln aus dem Prozess. Hydrophobe Teilchen, die Abmessungen zwischen 10 µm und 100 µm aufweisen, werden durch einen Flotationsprozess am besten entfernt. Der Druckfarbenflotationsprozess stellt einen Hetero-Koagulationsprozess dar.

---

<sup>6</sup> Fasern, die von einem 30-Mesh-Sieb zurückgehalten werden

<sup>7</sup> Fasern, die durch ein 30-Mesh-Drahtgeflecht hindurchströmen

---

Das Funktionsprinzip der Druckfarbenflotation basiert auf der Anlagerung von Druckfarbenpartikeln an Luftblasen, die in die Suspension eingebracht werden und als Schaum aus dem System entfernt werden.

Zur Ablösung der Druckfarben von den Fasern werden mechanische Energie, Chemikalien und eine erhöhte Temperatur benötigt. Für eine effektive Abtrennung der Druckfarbe von den Fasern werden dem Altpapier bereits im Zuge der Auflösung die Chemikalien Natronlauge, Wasserstoffperoxid, Wasserglas, Fettsäure und ggf. ein Komplexbildner zugegeben. Auf eine weitere Beschreibung des chemischen Prozesses wird an dieser Stelle verzichtet und auf die einschlägige Literatur verwiesen. Grundsätzlich kann jedoch festgehalten werden, dass sich der Flotationsprozess in vier Teilprozesse untergliedern lässt.

Bei diesen handelt es sich um:

- Stoffzufuhr,
- Luftzufuhr,
- Mischung von Luft und Suspension und
- Trennung von Gutstoff und Schaum [47].

---

### 5.2.1 Aufbau einer Flotationszelle

---

Der Aufbau von Flotationszellen ist in Abhängigkeit vom jeweiligen Hersteller durchaus unterschiedlich. Das Prinzip, welches der Druckfarbenentfernung zu Grunde liegt, ist jedoch identisch. Die Altpapiersuspension strömt durch den Zulauf in die Flotationszelle. Gleichzeitig wird Luft in das System eingetragen. Die Druckfarbenpartikel und die hydrophoben Verunreinigungen lagern sich an die Luftblasen an und steigen mit diesen an die Oberfläche. Der Schaum wird dann mittels einer Räumvorrichtung in den Überlauf befördert. Der Gutstoff wird wiederum am Boden der Flotationszelle abgezogen und entweder einer weiteren Flotationszelle oder dem folgenden Prozess in der Stoffaufbereitung zugeführt. Der schematische Aufbau einer Flotationszelle ist in **Abbildung 8** dargestellt.

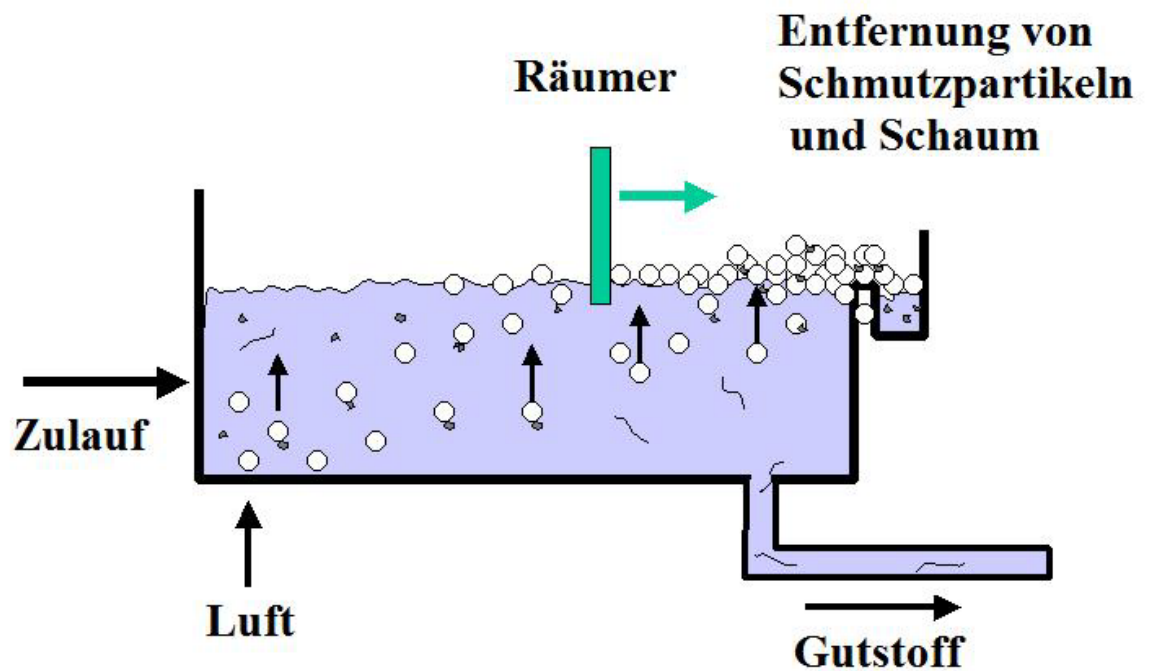


Abbildung 8 Aufbau einer Flotationszelle (Darstellung in Anlehnung an [48])

#### 5.2.1.1 Sulzer- Escher Wyss CF-Flotationszelle

Die Sulzer- Escher Wyss CF Flotationszelle geht auf Entwicklungen in den 1980er und 1990er Jahren zurück. In diversen Patenten sind der Aufbau und die Funktion der Zelle ausführlich dargelegt. In **Abbildung 9** sind beispielhaft zwei übereinander stehende Flotationsbehälter dargestellt. So finden sie sich auch in Anlage A.



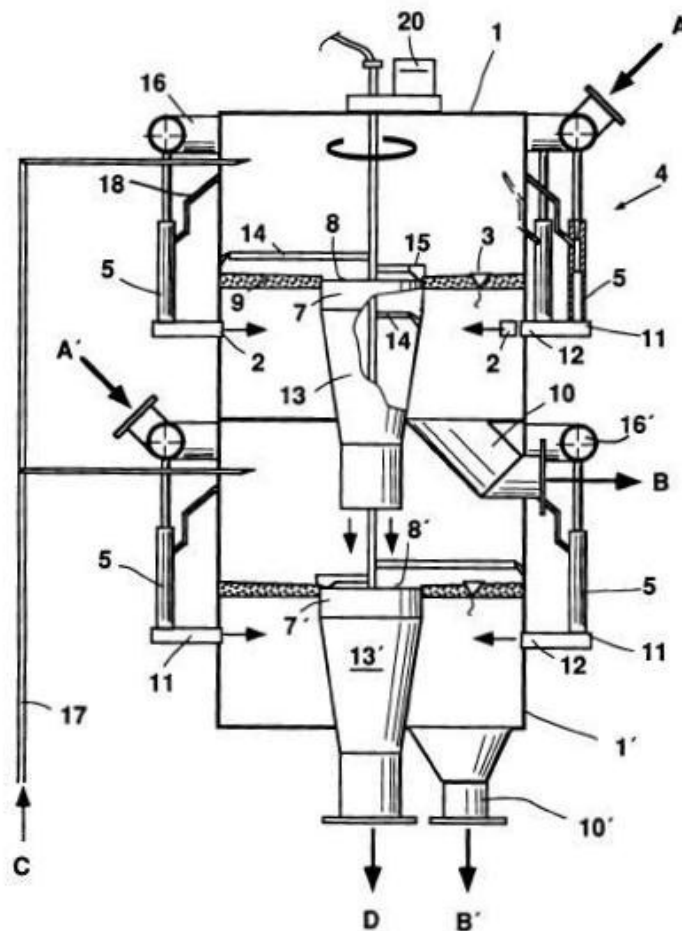


Abbildung 9 Sulzer- Escher Wyss CF-Flotationszelle [49]

Der ungereinigte Graustoff wird durch jeweils eine Ringleitung (16,16') den Belüftungsvorrichtungen (4) zugeführt, welche mehrere Stufendiffusoren (5,5') enthalten. Über die Stufendiffusoren wird Luft aus der Umgebung angesaugt. Dadurch bilden sich infolge einer Wirbelströmung kleine Luftblasen in der einströmenden Suspension. Über die Zuführöffnungen (2) gelangt die Stoffsuspension in die Behälter. Der Zulauf des luftbeladenen Graustoffes erfolgt dabei tangential etwas unterhalb der Suspensionsoberfläche. Druckfarbenpartikel und hydrophobe Verunreinigungen, wie Stickies, lagern sich an die Luftblasen an, welche als Schaum an die Oberfläche der in den Flotationsbehältern befindlichen Suspension aufsteigen. Der Gutstoff, welcher durch die Pfeile B und B' symbolisiert wird, wird am Boden des Flotationsbehälters abgeführt.



Der Flotationsschlamm D wird über den Überlauf (8,8') und den Schlammtrichter (13,13') abgeführt. In Abbildung 9 werden Wasserspritzrohre durch die Nummer 14 gekennzeichnet, welche eine schnelle Zerstörung und Abfuhr des Schaums ermöglichen.

Durch die geschlossene Bauweise der Flotationszellen kann aus dem Schaum (9) austretende Luft erneut zur Belüftung des Graustoffes verwendet werden und die Geruchsbelastung für die Umgebung auf ein Minimum reduziert werden. Über eine Leitung (18) gelangt die Luft aus dem Raum oberhalb der Suspension zurück in die Belüftungsvorrichtung (4) [49].

Die Entwicklung dieser Form der Belüftung der Stoffsuspension hat eine verbesserte Abtrennung von Störstoffen bei einer zeitgleichen Verringerung des benötigten Energiebedarfs zur Folge [47].

Die Regelung der Sulzer-Escher Wyss CF-Flotationszellen kann sowohl mit elektronischen als auch mit pneumatischen Reglern erfolgen. An jeder Zelle befindet sich ablaufseitig ein Niveauregler (LIC). Zulaufseitig findet sich ein Druckaufnehmer (PIA). Zwischen Zulaufdruck und Durchsatzvolumen der Stufendiffusoren ist der Zusammenhang bekannt. Somit ermöglicht der Druckaufnehmer vor der Flotationszelle einen Rückschluss auf den Durchsatz [47].

---

#### 5.2.1.2 Voith EcoCell-Flotationszelle

---

Die Flotationszelle Voith EcoCell ist aus der Entwicklung der Voith-Sulzer E-Zelle und der zuvor vorgestellten CF-Flotationszelle hervorgegangen. Sie vereint die Vorteile der beiden Zellen. So zeichnet sich die sogenannte E-Zelle durch eine fast unbegrenzte Baugröße und eine einfache Regelung aus, während in den CF- Zellen ein breites Partikelgrößenspektrum abgeschieden werden kann [50]. Eine Flotationsstufe bestehend aus drei Flotationszellen ist in **Abbildung 10** dargestellt. Die Luftansaugung erfolgt wie bei den zuvor beschriebenen CF-Flotationszellen über selbstansaugende Stufendiffusoren. Der Schaum, der aus Flüssigkeit, Fasern, Füllstoffen und Druckfarben besteht, fließt über ein Schaumwehr in eine Schaumrinne ab. Die ovale Konstruktion der Voith EcoCell ist in **Abbildung 11** im Querschnitt abgebildet.

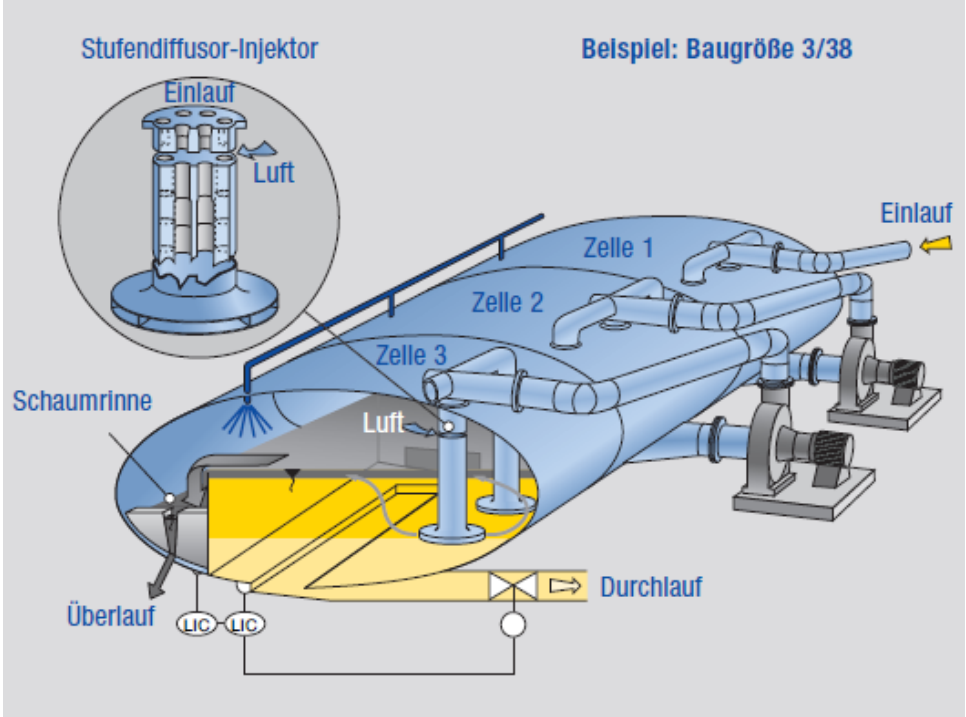


Abbildung 10 Voith EcoCell Flotationsstufe [51]

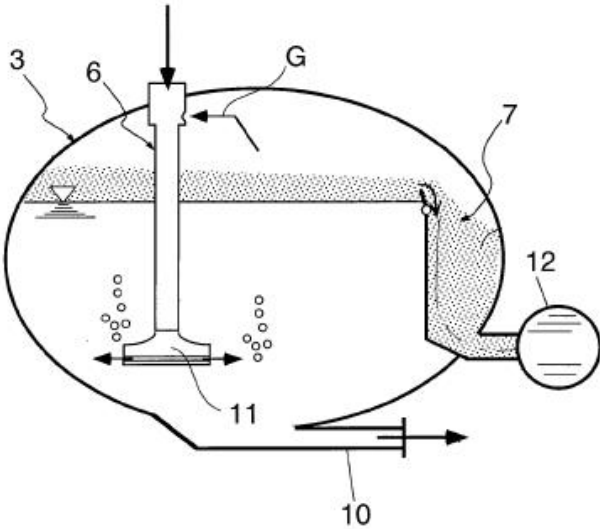


Abbildung 11 Schnitt durch eine EcoCell-Flotationszelle [52]

---

### 5.2.2 Einflussparameter für den Flotiervorgang

---

Laut Bos et al. liegt der optimale Arbeitsbereich für die Stoffdichte bei der Flotation zwischen 0,8 % und 1,0 %. Eine Flotation bei höheren Stoffdichten erfordert eine größere Luftmenge und ist mit einem höheren Energieeinsatz verbunden. Nach Körkkö stellen der Zulaufvolumenstrom, die Stoffdichte des Zulaufvolumenstroms, sowie der angesaugte Luftstrom die wichtigsten Einflussparameter für den Flotiervorgang dar [53]. Der Zulaufvolumenstrom ist online messbar und die Stoffdichte der Stoffströme leicht ermittelbar.

Da es sich bei der Flotation um einen Prozess handelt, der durch viele Mikroprozesse und die Wechselwirkungen zwischen den Luftblasen und den hydrophoben Partikeln beeinflusst wird, existiert eine Reihe weiterer Faktoren, welche für das Ergebnis einer Deinking-Flotation eine Rolle spielen. Diese sind jedoch für diese Arbeit nicht relevant und werden daher von der Betrachtung ausgeschlossen. An dieser Stelle soll lediglich das Verhältnis der Größe der Luftblasen in der Expansionsphase als Einflussparameter genannt werden, da diesem ein signifikanter Einfluss auf das Flotationsergebnis nachgesagt wird. Praktisch messbar ist dieses jedoch nicht. Für das Aufstiegsverhalten der Luftblasen in der Flotationszelle und den Austrag der Druckfarben sind zudem auch die Abmessungen der Flotationszelle, die eingestellte Überlaufmenge und damit der Füllstand der Flotationszelle sowie die Turbulenz in der Zelle von Bedeutung [54].

Für die optischen Eigenschaften des zu fertigenden Papiers spielen zudem die Dosierung der Chemikalien sowie der Grad der Dispergierung der Druckfarbe, also die Partikelgröße, eine wichtige Rolle. Laut Bajpai sind zudem die Wasserhärte sowie der pH-Wert der Suspension relevant für das Flotationsergebnis. Der Gehalt an Calcium-Ionen sollte bei etwa 150 ppm liegen, während ein pH-Wert oberhalb von 8,5 einzustellen ist. Das Temperaturniveau bei der Flotation sollte zwischen 40 °C und 45 °C liegen [55].

---

### 5.2.3 Mathematische Beschreibung des Flotiervorganges

---

Die wohl wichtigste Größe zur mathematischen Beschreibung des Flotationsvorganges ist die Ausbeute. Moe und Røring unterscheiden dazu zwischen der Gesamt-Stoffausbeute  $A_T$ , der Füllstoff-Ausbeute  $A_F$  sowie der Faser-Ausbeute  $A_W$ , wobei bei den Indizes die

englischen Begriffe „total“ mit T, „fillers“ mit F und „woody materials“ mit W abgekürzt werden. Die Ausbeuten sind wie folgt definiert:

$$A_T = \frac{\dot{m}_A}{\dot{m}_F} \quad (17)$$

$$A_F = \frac{X_A * \dot{m}_A}{X_F * \dot{m}_F} = A_T * \frac{X_A}{X_F} \quad (18)$$

$$A_W = \frac{(1 - X_A) * \dot{m}_A}{(1 - X_F) * \dot{m}_F} = A_T * \frac{1 - X_A}{1 - X_F} \quad (19)$$

$\dot{m}_F$ ,  $\dot{m}_A$  und  $\dot{m}_R$  stehen für den Massendurchsatz in Zulauf (Feed F), Durchlauf/ Gutstoff (Accept A) sowie Überlauf/Rejekt (Reject R).  $X_F$ ,  $X_A$  und  $X_R$  stellen wiederum die Massenanteile des Füllstoffes in der Fasersuspension dar.

Unter der Annahme, dass das Verdünnungswasser keinerlei Fasern, Füllstoffe oder Stickies in die Flotation einträgt, gelten für die Flotation folgende Gleichungen:

$$\dot{m}_F = \dot{m}_A + \dot{m}_R \quad (20)$$

$$X_F * \dot{m}_F = X_A * \dot{m}_A + X_R * \dot{m}_R \quad (21)$$

Aus diesen Formeln ergeben sich für die Gesamt-Stoffausbeute, die Füllstoff-Ausbeute sowie für die Faser-Ausbeute:

$$Y_T = \frac{X_R - X_F}{X_R - X_A} \quad (22)$$

$$Y_F = \frac{X_A * (X_R - X_F)}{X_F * (X_R - X_A)} \quad (23)$$

$$Y_W = \frac{(1 - X_A) * (X_R - X_F)}{(1 - X_F) * (X_R - X_A)} \quad (24)$$

Für die Wasserbilanz gilt folgende Grundgleichung, wobei  $\dot{m}_{WW}$  für den Massenstrom an Verdünnungswasser steht:

$$\dot{m}_F + \dot{m}_{WW} = \dot{m}_A + \dot{m}_R \quad (25)$$

Diese Formel lässt sich umstellen zu:

$$\dot{m}_F * (1 - X_F - Z_F) + \dot{m}_{WW} = \dot{m}_A * (1 - X_A - Z_A) + \dot{m}_R * (1 - X_R - Z_R) \quad (26)$$

$Z_F$ ,  $Z_A$  und  $Z_R$  stehen dabei für die massenbezogenen Faseranteile in den einzelnen Fraktionen [56].

Neben den vorgestellten Formeln, gelten für die Berechnung der Trenneffizienzen die Formeln für die Feinsortierung, welche in Kapitel 5.1.1.3 bereits vorgestellt wurden.

Um die Auswirkungen des Flotationsvorganges zu erfassen, werden diverse überwiegend optische Untersuchungen an Laborblättern durchgeführt. Die optischen Eigenschaften von Papieren sind insbesondere für die Hersteller von grafischen Papieren von besonderer Bedeutung. Zur Bewertung des Deinkingerfolges werden mehrere Werte herangezogen. Neben der Helligkeit Y, dem Weißgrad R457 und dem ERIC-Wert (Effective Residual Ink Concentration), der FI-Wert (Flotable/ Free Ink), sowie der FIRE-Wert (Free Ink Removal Efficiency), der in der Literatur auch unter der Bezeichnung IR-Wert (Ink Removal) oder IE-Wert (Ink Elimination) zu finden ist. Die Werte berechnen sich dabei wie folgt:

$$FI = \frac{ERIC - ERIC_{HW}}{ERIC} * 100 \% \quad (27)$$

Zur Ermittlung des FI-Wertes werden der ERIC-Wert einer Probe sowie der ERIC-Wert derselben hypergewaschenen<sup>8</sup> Probe bestimmt. Der FIRE-Wert berechnet sich wiederum aus der Differenz des ERIC-Wertes des Zulaufs (Feed F) und dem ERIC-Wert des Gutstoffes (Accept A) dividiert durch die Differenz des ERIC-Wertes des Zulauf und dem ERIC-Wert einer hypergewaschenen Gutstoff-Probe (hypergewaschenes Accept A,HW)

$$FIRE = \frac{ERIC_F - ERIC_A}{ERIC_F - ERIC_{A,HW}} \quad (28)$$

Laut INGEDE-Methode Nr. 2 ist es möglich, auf die Hyperwäsche an dieser Stelle zu verzichten und den  $ERIC_{A, HW}$ -Wert zu Null zu setzen.

Eine andere Möglichkeit, um den FIRE-Wert einer Stoffprobe zu bestimmen, stellt folgende Formel dar [53]:

$$FIRE = \left\{ 1 - \left( 1 - \frac{RR_m}{100} \right) * \frac{ERIC_A}{ERIC_F} \right\} * 100 \% \quad (29)$$

Zur Ermittlung der Entfernung bestimmter Komponenten werden die aus Kapitel 5.1.1.3 bekannten Terme verwendet. Diese werden hier noch einmal wiederholt:

$$E_R = \frac{\dot{m}_R * c_R * w_{i,R}}{\dot{m}_F * c_F * w_{i,F}} * 100 \% \quad (30)$$

$$E_R = \frac{RR_m}{1 - Q + Q * RR_m} \quad (31)$$

---

### 5.3 Dispergierung

---

Die Dispergierung dient bei der Aufbereitung von Altpapier im Wesentlichen der Zerkleinerung von Schmutzpunkten. Zudem werden Stickies, welche nicht durch die Sortierungsprozesse oder die Flotation aus dem Aufbereitungsprozess ausgeschleust

---

<sup>8</sup> nach INGEDE-Methode Nr. 5

---

wurden, durch den Dispergierungsprozess in ihrer Größenverteilung verändert. Die Dispergierung findet bei hohen Stoffdichten zwischen 25 % und 35 % und vergleichsweise hohen Temperaturen um 100 °C statt. Dadurch werden die Fasern einem starken Reibungseffekt unterworfen, was dazu führt, dass den Fasern anhaftende Farbpartikel von diesen abgelöst werden und im anschließenden Flotationsprozess leichter entfernt werden können oder, dass sie bis unter die Sichtbarkeitsgrenze zerkleinert werden. Des Weiteren hat die hohe Temperatur im Disperger eine Zerstörung von Katalasen sowie eine Reduktion der Keimzahl zur Folge.

Außerdem wird oftmals am Disperger ein Bleichmittel zugegeben und der Disperger als Dispergierbleiche betrieben.

---

### **5.3.1 Aufbau eines Dispergers**

---

Bezüglich des Aufbaus eines Dispergers lassen sich zwei unterschiedliche Prinzipien gegeneinander abgrenzen. Diesen beiden Prinzipien ist jedoch gemeinsam, dass sie den Altpapierstoff starken mechanischen und thermischen Beanspruchungen aussetzen. Zudem wird für den Betrieb beider Disperger-Bauarten ein ähnlicher Energiebedarf von 60 bis 80 kWh pro Tonne Durchsatz aufgewendet.

---

#### **5.3.1.1 Knet-Disperger**

---

Knet-Disperger stellen die einfachste Form von Dispergier-Maschinen dar. Der schematische Aufbau eines Knet-Dispergers ist in **Abbildung 12** dargestellt.



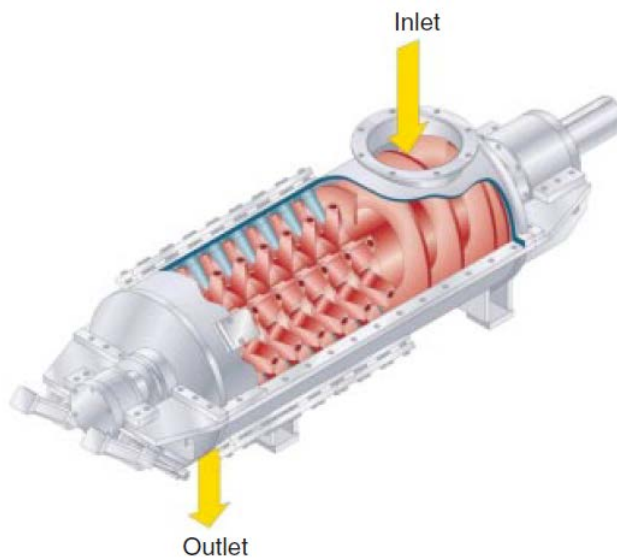


Abbildung 12 Knet-Disperger der Firma Voith [57]

Ihr Haupteinsatzgebiet liegt in der Aufbereitung von braunen Verpackungspapieren. Durch eine vergleichsweise lange Verweildauer in der Maschine wird der Fertigstoff optisch homogenisiert und eine Erhöhung des Volumens durch eine Veränderung des Fasercurls und der Faserfibrillierung erreicht.

Der Knet-Disperger ist für Anwendungen zu bevorzugen, bei denen der Mahlgrad nach Schopper-Riegler des behandelten Stoffes nicht verändert werden soll. Auch unter hohem Energieeintrag bleibt der Mahlgrad unverändert. Insbesondere beim Deinking von „Non-Impact-Printing“-Druckprodukten finden Knet-Disperger Anwendung.

Durch den Einsatz von Knet-Dispergern wird die Druckfarbe von Fasern abgelöst und führt zu einer direkten Erhöhung des Weißgrades. Der Einsatz von Knet-Dispergern ist auch bei geringen Temperaturen möglich, was ihn in der industriellen Anwendung auch von kostentechnischer Seite ansprechend macht [55]. Nachteilig wirkt sich jedoch die mangelnde Dispergierwirkung von Stickies im Vergleich zu Scheibendispergern aus [58].

---

#### 5.3.1.2 Scheibendisperger

---

Der Scheibendisperger stellt die am häufigsten eingesetzte Lösung der in Papierfabriken vorkommenden Dispergiertechnologien dar. Er zeichnet sich im Vergleich zum Knet-Disperger durch einen leicht höheren Temperaturbereich (90-130°C) sowie eine höhere

Geschwindigkeit zwischen Rotor und Stator aus. Während der Knet-Disperger mit Geschwindigkeiten zwischen 7 m/s und 13 m/s betrieben wird, laufen Scheibendisperger mit Geschwindigkeiten zwischen 50 m/s und 60 m/s [59]. Eine schematische Abbildung eines Scheibendispergers findet sich in **Abbildung 13**.

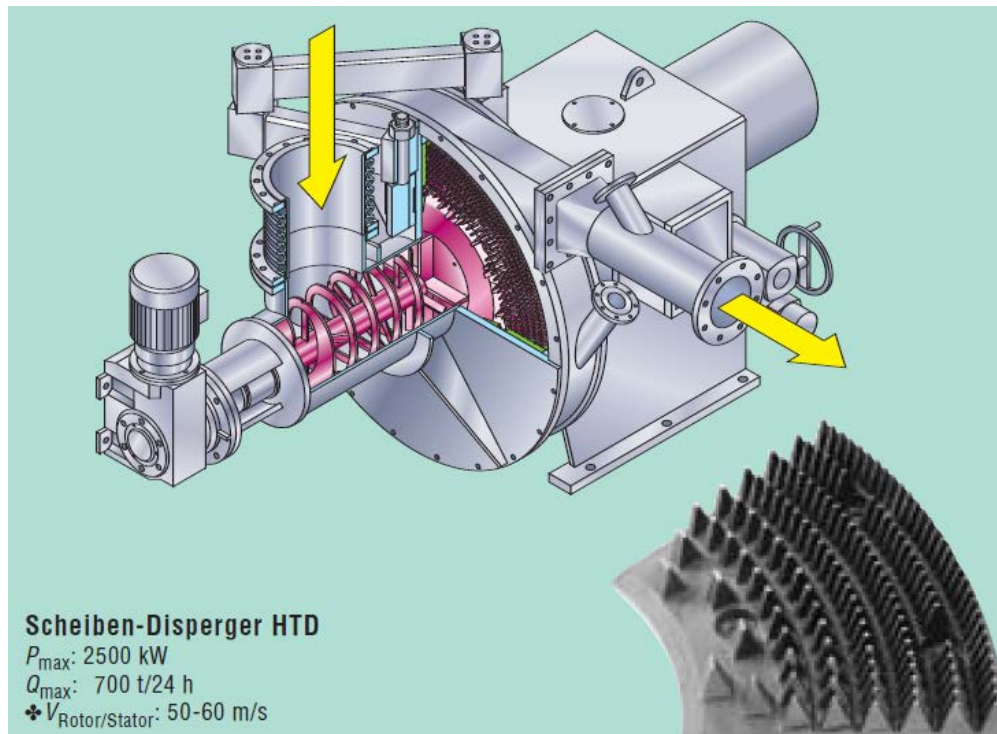


Abbildung 13 Schematische Abbildung eines Scheibendispergers [58]

Der Scheibendisperger hat seine Vorteile bei der Entwicklung von Festigkeitseigenschaften sowie bei der Entfernung von konventionellen Druckfarben, wie sie beispielsweise im Zeitungsdruck eingesetzt werden. Die Druckfarben werden im Gegensatz zum Knet-Disperger jedoch zerkleinert und dispergiert. Eben diese Zerkleinerung der Schmutzpartikel birgt jedoch auch Nachteile. Durch die Dispergierung mit einem Scheibendisperger steigt die absolute Fläche der Schmutzteilchen, was wiederum einen Rückgang des Reflexionsvermögens zur Folge hat und dazu führen kann, dass das Papier bis zu 2° ISO-Weiße verlieren kann. Durch eine nach dem Disperger im Aufbereitungsprozess angeordnete weitere Flotation des Altpapierstoffes, der sog. Nachflotation, ist dieser Weißeverlust wieder kompensierbar.

---

### 5.3.2 Einflussparameter für den Dispergiervorgang

---

Ziele der Dispergierung sind die Zerkleinerung und Dispergierung von Schmutzpunkten und Stickies, welche in den vorgelagerten Prozessen nicht ausgetragen wurden. Ähnlich wie bei der Beschreibung der Drucksortierung lassen sich die Einflussparameter auch für die Dispergierung in drei Kategorien – Design-, Betriebs- und Faserqualitätsparameter – einteilen. Laut Bajpai sind für die Erreichung dieses Zieles der Dispergierung drei wesentliche Einflussgrößen heranzuziehen. Diese sind das sogenannte Garnitурdesign, die Temperatur des Faserstoffs im Disperger sowie die spezifische Dispergierarbeit. Letztere stellen die wichtigsten Betriebsparameter dar und sind leicht ermittelbar. Kriebel et al. sehen zusätzlich die Stoffdichte des Faserstoffs und den Füllstoffgehalt als entscheidende Faserqualitätskenngrößen an [58].

Zur Bewertung des Dispergierergebnisses werden überwiegend optische Messverfahren herangezogen. Die Gründe wurden bereits in Kapitel 5.3.1.2 erörtert.

---

### 5.3.3 Mathematische Beschreibung des Dispergiervorganges

---

Der einfachste Weg, um die mechanischen Vorgänge in einem Disperger mathematisch zu beschreiben, ist, den spezifischen Energieverbrauch, also die aufgewendete Energie pro Einheit Trockenmaterial in kWh/t, zu betrachten. Auf diese Weise ist auch ein direkter Einbezug von ökonomischen Parametern möglich. Es ist jedoch nicht möglich, vom spezifischen Energieverbrauch direkt auf Phänomene, die während der mechanischen Behandlung auftreten, zurückzuschließen. Verschiedene Ansätze, die ursprünglich aus der Mahltheorie stammen, werden an dieser Stelle eingesetzt, um die Vorgänge während der Hochgeschwindigkeits-Dispergierung zu beschreiben.

Über die Formel

$$\begin{aligned} \text{reine Mahlleistung } P_{eff}^9 & \\ &= \text{aufgenommene Leistung } P_A - \text{Leerlaufleistung } P_{NL} \end{aligned} \quad (32)$$

---

<sup>9</sup> Auf den Faserstoff wirkende Leistung

---

definiert sich die spezifische Kantenbelastung SEL (*engl. specific edge load*) zu:

$$\frac{\text{reine Mahlleistung } P_{eff}}{\text{sek. Kantenlänge } CEL} = \text{spez. Kantenbelastung } SEL \quad (33)$$

$$SEL = \frac{P_A - P_{NL}}{CEL}$$

Die sekundliche Schnittlänge CEL (*engl. „cutting edge length“*) berechnet sich wiederum über folgende Formel:

$$CEL = BEL * n \quad (34)$$

$$BEL = Z_R * Z_S * l$$

BEL steht für die Stablänge (*engl. „bar edge length“*),  $Z_R$  beschreibt die Anzahl der Stäbe des Rotors,  $Z_S$  wiederum die Anzahl der Stäbe des Stators.  $l$  steht für die Länge eines Stabes. Es wird angenommen, dass die Behandlung (Tintenablösung, Partikelzerkleinerung, etc.) bevorzugt an den Kanten der Stäbe der dispergierenden Elemente erfolgt. Es wurde zudem angenommen, dass die Größe der Kraft an den Kanten des Hochgeschwindigkeits-Dispergers als der kritische Faktor der Druckfarbenablösung angesehen werden kann [60, 61].

Zur Berechnung der spezifischen Mahlenergie SRE werden die reine Mahlleistung  $P_{eff}$  in kW und der Dispergerdurchsatz  $F$  in kg otro/s herangezogen.

$$SRE = \frac{P_{eff}}{F} \quad (35)$$

Durch die scherende Bewegung zwischen Rotor und Stator des Dispergers werden sowohl Störstoffe als auch Fasern in ihrer Größe beeinflusst. Fasern aus der Langfaserfraktion LF werden infolge der Belastung zu Fasern im Kurzfaserbereich KF, und Fasern aus dem Kurzfaserbereich „wandern“ in den Feinstoffbereich FS.

---

Für die Mahlung verschiedener Zellstoffe konnten folgende Formeln ermittelt werden, die das Verhalten hinreichend wiedergeben:

$$FS = FS(0) + KF(0) * (1 - b_{res}^{SRE/100}) \quad (36)$$

$$KF = KF(0) * b_{res}^{SRE/100} + LF(0) * (1 - c_{res}^{SRE/100}) \quad (37)$$

$$LF = LF(0) * c_{res}^{SRE/100} \quad (38)$$

Die Faktoren  $b_{res}$  und  $c_{res}$  entstammen einem Modell der schrittweisen Zerkleinerung und definieren den Widerstand der Fasern aus Lang- und Kurzfasern gegenüber einer Kürzung. Der Wert 1 beschreibt einen absolut mahlbeständigen Zustand. Der Wert 0 einem Zustand mit keinerlei Mahlwiderstand. Auf eine nähere Ausführung der Parameter soll an dieser Stelle verzichtet werden und auf die Fachliteratur verwiesen werden [62, 63].

---

## 6 Vorüberlegungen

---

Zur Umsetzung einer betrieblichen Stoffstromanalyse, welche die Grundlage für eine Nachhaltigkeitsanalyse darstellt, ist die Kenntnis der stofflichen und energetischen Umwandlungsprozesse nötig. Nur so lassen sich ökonomische Aktivitäten unter Umweltaspekten zielgerichtet steuern [18].

Für die Entwicklung der Modelle soll zu diesem Zweck auf die in Kapitel 4.2 beschriebenen Phasen der Erstellung einer Ökobilanz zurückgegriffen werden. In dieser Arbeit soll keine vollständige Ökobilanz für die gesamte Prozesskette der Altpapieraufbereitung erstellt werden. Es werden lediglich Modelle für die Feinsortierung, die Flotation sowie die Dispergierung erstellt.

Die Phasen der Ökobilanz gliedern sich in die Festlegung des Ziels und des Untersuchungsrahmens, die Sachbilanz mit anschließender Wirkungsbilanz und die abschließende Auswertung. Diese werden in den folgenden Kapiteln erläutert. Zuvor werden die wichtigsten Fachbegriffe erörtert. Darunter fallen unter anderem die Definition des Modellbegriffes, die Erläuterung der Parameter und die ermittelten Indikatoren.

---

### 6.1 Modelle

---

Modelle stellen eine in der Komplexität reduzierte Form der Abbildung der Realität dar. Es handelt sich um formale, oftmals vereinfachte mathematische Funktionen, die Prozesse bzw. deren Wechselwirkungen abbilden und somit Prozesse analysierbar machen. Durch die Erstellung von Modellen können, je nach Art des Modelles, bestimmte Phänomene erklärt werden, Ursache-Wirkungs-Zusammenhänge verstanden oder auch die Erreichung von Zielen unter Beachtung definierter Randbedingungen optimiert werden.

Allgemein werden Modelle differenziert nach der Art der erfassten Daten in quantitative und semi-/nicht-quantitative, statische und dynamische Modelle. Insbesondere für die Nachhaltigkeitsanalyse von Prozessen können laut Grunwald und Kopfmüller definierte Einflussfaktoren und Systemparameter sowie Wechselwirkungen quantitativ und qualitativ abgeschätzt werden. Modelle sind jedoch in ihrer Aussagefähigkeit stets begrenzt und stark von den getroffenen Annahmen abhängig [2].

Eine wichtige Grundlage für die Erstellung von Modellen stellt die Klärung der Datenverfügbarkeit sowie die Verknüpfung der einzelnen zuvor definierten Parameter dar. Die Verknüpfung von Parametern erfolgt durch sogenannte Indikatoren.

Ziel des EU-Projektes REFFIBRE ist die Erstellung dreier Arten von Modellen. Zum einen werden die Auswirkungen auf Energie- und Materialeinsparungen durch alternative Verwendung von Recyclingfasern im Laufe der Wertschöpfungskette modelliert. Des Weiteren sollen der Einfluss des eingesetzten Altpapiers auf die Eigenschaften des erzeugten Papiers herausgestellt werden und die für die Industriepartner wichtigsten Prozesse modelliert werden. Darunter fallen neben den Prozessen der Feinsortierung auch der Deinking-Prozess sowie die Fraktionierung und gezielte Ausschleusung von bestimmten Faserfraktionen aus dem Altpapieraufbereitungsprozess. Die Modellierung der Prozesse der Altpapieraufbereitung, Sortierung, Flotation und Dispergierung, sind Ziel dieser Arbeit. Die Modelle werden im Microsoft Excel-Format erstellt. Zur umfassenden Analyse werden die Ein- und Ausgänge der Prozesse verknüpft und die Zusammenhänge zwischen den Modellen entlang der Wertschöpfungskette analysiert.

Eine Beschreibung der Modelle wurde im Rahmen des REFFIBRE-Projektes vorgenommen. Diese ist in **Tabelle 2** dargestellt [64].

Tabelle 2 Struktur der Modelldefinition

Modelle	Bezeichnung des Modells
	Beschreibung des zu entwickelnden Modells
	Parameter, die in die Modellbeschreibung eingehen
	Inputs und Outputs
	Format des Modelles/ Datenstruktur
	Datenakquise/ Datenquelle
	Einschränkungen (z.B. Datenverfügbarkeit, Genauigkeit, Vertraulichkeit)
	In Unternehmen eingesetzte Werkzeuge zur Datenerfassung
	Beziehungen/ Verknüpfungen

## 6.2 Parameter

Parameter stellen messbare Faktoren dar, die einen spezifischen Prozess oder ein System definieren und sein Verhalten bestimmen. Die Ausführung der Definition von Parametern wird anhand der folgenden **Tabelle 3** erläutert:

Tabelle 3 Struktur der Parameterdefinition

Parameter	Bezeichnung des Parameters
	Beschreibung des Parameters
	Erfassung/ Messung des Parameters (Einheit etc.)
	Indikatoren, die mit diesem Parameter verknüpft sind
	Modelle, die mit diesem Parameter verknüpft sind

Für die Beschreibung von Sortierungs- und Flotationsprozessen wird eine Reihe von Parametern herangezogen. Oftmals handelt es sich dabei um qualitative Faktoren, die bspw. das Sortierergebnis beeinflussen, die jedoch in Industrieanlagen nicht quantitativ erfasst werden. Letztendlich wird dadurch eine Schätzung gewisser Parameter nötig.

### 6.3 Indikatoren

Die Beschreibung einer nachhaltigen Entwicklung in der Papierindustrie erfordert die Definition einer Reihe von Indikatoren. Diese Indikatoren müssen ökonomischer, ökologischer und sozialer Art sein, um einen nachhaltigen Entwicklungsprozess ausreichend abzubilden. Im Rahmen des EU-Projektes REFFIBRE wird die soziale Komponente nicht berücksichtigt. Der Fokus liegt auf den ökologischen Indikatoren, die eng mit den ökonomischen Indikatoren verknüpft sind. Die Indikatoren stellen die Verknüpfung zwischen den einzelnen Parametern entlang der Wertschöpfungskette dar. Die Struktur zur Beschreibung einzelner Indikatoren ist in **Tabelle 4** aufgeführt.

Tabelle 4 Struktur der Indikatorendefinition

Indikatoren	Bezeichnung des Indikators
	Beschreibung des Indikators
	Berechnung des Indikators (Einheit etc.)
	Kriterien für die Priorisierung von Indikatoren
	Beziehungen/ Verknüpfungen



---

Insbesondere die Priorisierung von Indikatoren, also die Vorrangigkeit eines Indikators gegenüber einem anderen, spielt für diese Arbeit eine wichtige Rolle. Eine Möglichkeit, um die Indikatoren nach ihrer Bedeutsamkeit zu gewichten, erfolgt durch die sog. SMART-Bedingung<sup>10</sup>.

Im Zuge des REFFIBRE-Projektes werden fünf Indikatoren im Detail untersucht. Zu diesen zählen Energie, Wasser, Emissionen, Roh- und Reststoffe sowie dazugehörige ökonomische Indikatoren unterschiedlichster Ausprägung. Die ökonomischen Indikatoren weisen eine starke Verknüpfung mit den zuvor genannten ökologischen Indikatoren auf.

Zur Ermittlung des Verbrauchs an Ressourcen oder dem Ausstoß von Emissionen haben sich sog. „Footprint“-Verfahren etabliert. So definiert der „Water Footprint“ beispielsweise den menschlichen Fußabdruck des Wasserverbrauchs, der die Gesamtmenge an Wasser umfasst, die für die Produktion der Güter und Dienstleistungen benötigt wird, welche die Bevölkerung eines Landes in Anspruch nimmt. Des Weiteren sind der „Carbon Footprint“ sowie der „Ecological Footprint“ zu nennen. Der Carbon Footprint definiert die Bilanz der Treibhausgasemissionen entlang des gesamten Lebenszyklus eines Produktes in einer definierten Anwendung bezogen auf eine bestimmte Nutzeinheit. Der Ecological Footprint beschreibt wiederum die Fläche auf der Erde, die notwendig ist, um den Lebensstandard eines Menschen unter Beachtung der aktuellen Produktionsbedingungen dauerhaft zu ermöglichen.

---

#### **6.4 Definition von Bilanzierungsziel und Untersuchungsrahmen**

---

Bei der Festlegung des Untersuchungsrahmens steht das zu untersuchende System mit seinen Funktionen im Mittelpunkt der Betrachtung. Zudem muss das Ziel der Untersuchung festgelegt werden. Von besonderem Interesse sind neben der Festlegung der Systemgrenzen und der angesetzten Datenqualität auch die getroffenen Annahmen und Einschränkungen sowie die Methoden der Auswertung und der Wirkungsabschätzung [10].

---

<sup>10</sup> Ausdruck aus dem Projektmanagement zur eindeutigen Definition von Zielen (Spezifisch-Messbar-Akzeptiert-Realistisch-Terminiert)

Im Mittelpunkt dieser Arbeit steht die Optimierung der Stoffaufbereitung nach Nachhaltigkeitskriterien. Den Ausgangspunkt bildet die Analyse der bestehenden Stoffaufbereitungsprozesse und die anschließende Modellierung und Abbildung der Prozesse. Anhand der Modellierung sollen zu einem späteren Zeitpunkt Entscheidungen getroffen werden, inwiefern beispielsweise eine gezielte Entfernung einer Faserfraktion sinnvoll erscheint und der Verbesserung der Papiereigenschaften dient.

Im Rahmen dieser Arbeit wird das System zunächst nach der Festlegung einer räumlichen Systemgrenze betrachtet. Dies wird in einem Fließbild festgehalten. Für die Darstellung der Prozesse, Sortierung, Flotation und Dispergierung hat dies folgende Auswirkungen:

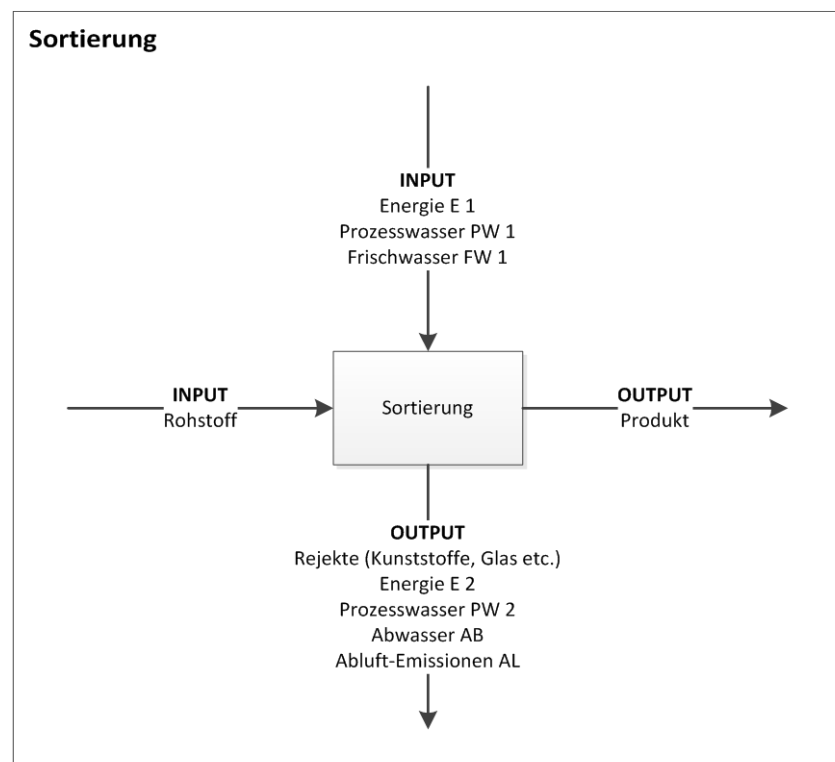


Abbildung 14 Stoffflussschema eines Sortierprozesses

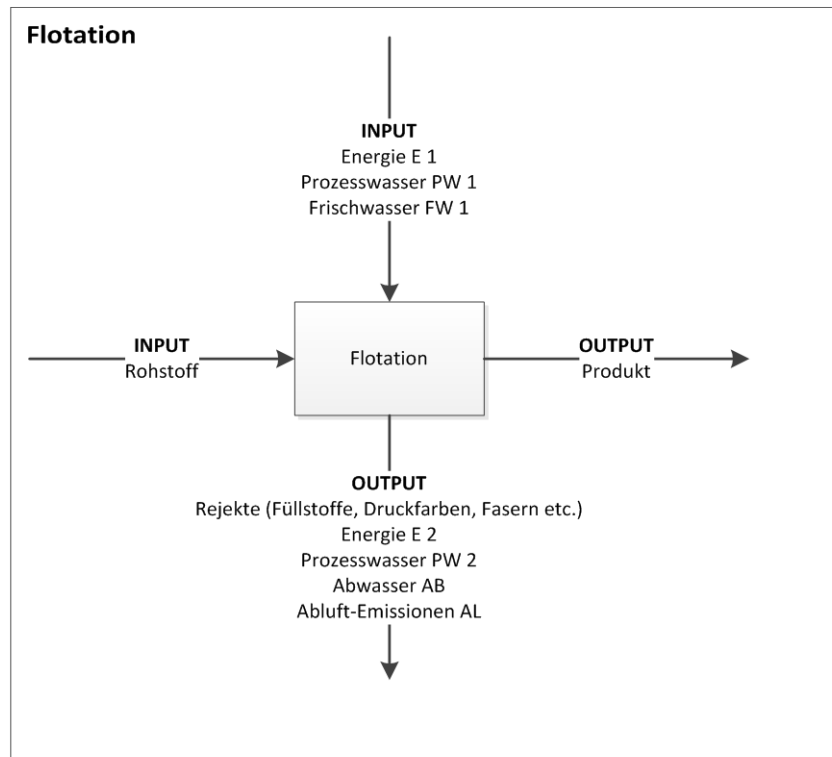


Abbildung 15 Stoffflussschema eines Flotationsprozesses

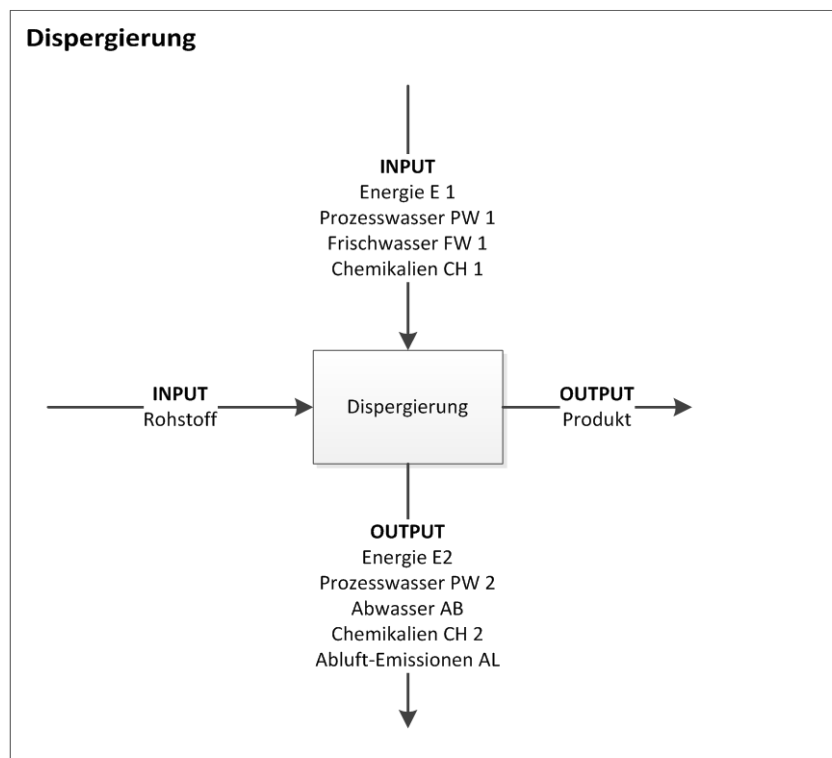


Abbildung 16 Stoffflussschema eines Dispergierprozesses

---

Im Hinblick auf die zeitliche Systemgrenze, werden je nach Verfügbarkeit der Daten sowohl Momentaufnahmen als auch gemittelte kontinuierlich aufgezeichnete Daten begutachtet. Da in den Systemen keine umfassende Messung und Erfassung aller Stoffströme erfolgt, ist hier das Treffen von Annahmen unumgänglich. Auch die Vermessung der Stoffe stellt lediglich eine Momentaufnahme dar. Diese Momentaufnahme kann sich aufgrund von Messtoleranzen durchaus auch in der Modellerstellung in Form von Abweichungen oder sogar Widersprüchlichkeiten widerspiegeln. Unter Umständen ist es an dieser Stelle ebenfalls nötig, Annahmen zu treffen, um eventuelle Messtoleranzen zu korrigieren und um die Genauigkeit des Modelles zu verbessern.

Die Untersuchung der Proben erfolgt nach DIN- und ISO-Normen, sowie nach TAPPI-Standards und anerkannten INGEDE-Methoden anhand eines festgelegten Parametervektors. Dieser wird in Kapitel 8.1 eingeführt und eingehend betrachtet. Anhand dieser Festlegung ist die Nachvollziehbarkeit der Versuche gewährleistet und die Ergebnisse sind reproduzierbar.

---

#### **6.4.1 Anforderungsliste**

---

In einem Entwicklungsprozess ist insbesondere die Erarbeitung einer Anforderungsliste von besonderer Bedeutung. Für die Modellierung der Stoffaufbereitungsprozesse ergeben sich diverse Anforderungen. Im Rahmen dieser Arbeit sind neben den aus der Aufgabenstellung hervorgehenden Anforderungen noch weitere Voraussetzungen von Relevanz. Diese werden in den folgenden Kapiteln vorgestellt.

---

##### **6.4.1.1 Anforderungen aus der Aufgabenstellung**

---

Zu den Anforderungen, welche sich aus der Aufgabenstellung dieser Arbeit ergeben, zählen:

- Die zu erstellenden Modelle sollen die papiertechnischen Prozesse – Sortierung, Flotation und Dispergierung – abbilden.
- Die Modelle sollen sowohl die Eigenschaften der Edukte und Produkte der einzelnen Teilprozesse als auch die Eigenschaften des Prozesses beschreiben.

- 
- Die Modelle sollen die Eigenschaften des fertigen Papiers berücksichtigen; eine Optimierung der Papiereigenschaften soll unter Berücksichtigung der Optimierung der Altpapieraufbereitungsprozesse möglich sein.
  - Die zu erstellenden Modelle sollen die zur Beschreibung der Prozesse notwendigen Parameter mitführen und an gegebener Stelle neue Parameter einführen und berechnen.
  - In den Modellen sollen Design-, Ausstattungs- und Betriebsparameter der Altpapieraufbereitungsprozesse berücksichtigt werden.
  - Die Modelle sollen zur Bewertung der Nachhaltigkeit der Prozesse Indikatoren mitführen.
  - Die Verknüpfung der Parameter in den Modellen soll durch Indikatoren erfolgen.
  - Die Nachhaltigkeitsindikatoren sollen den Anforderungen des Drei-Säulen-Modells der Nachhaltigkeit gerecht werden (ökologische, ökonomische und soziale Komponente).
  - Die erforderlichen Messgrößen (Nachhaltigkeitsindikatoren/ Charakteristika des fertigen Papiers) sollen in Zusammenarbeit mit der Projektgruppe des EU-Projektes REFFIBRE festgelegt werden.
  - Anhand der ermittelten Nachhaltigkeitsindikatoren soll eine Optimierung der Produkte und Prozesse durchgeführt werden.

---

#### **6.4.1.2 Weitere Anforderungen**

---

Neben den Anforderungen, welche sich aus der Aufgabenstellung ergeben, sind folgende Anforderungen für die Entwicklung der Modelle von Bedeutung:

- Die zu entwickelnden Modelle sollen die komplexen Sachverhalte der Altpapieraufbereitungsprozesse – Sortierung, Flotation und Dispergierung – vereinfacht und verständlich wiedergeben ohne an Informationsgehalt zu verlieren.
- Die Modellierung der Prozesse muss möglichst realitätsnah erfolgen; nur wenige Annahmen und Annäherungen sollen getroffen werden.
- Die Modelle müssen einfach umzusetzen sein.
- Die Modelle müssen erweiterbar sein und an gegebene Bedingungen und Prozessveränderungen angepasst werden können.

- 
- Die Modelle müssen vertrauenswürdige und nachprüfbare Ergebnisse liefern.
  - Die Modelle sollten die Rahmenbedingungen der Ökobilanz nach DIN EN ISO 14040 und 14044 erfüllen um in diesem Rahmen erweitert und genutzt werden zu können.

---

## 6.5 Sachzielbilanz

---

Die Sachzielbilanz enthält eine weitere Spezifizierung der in Kapitel 6.1 getroffenen Annahmen. Die Norm DIN EN ISO 14040 definiert Sachzielbilanzen wie folgt:

*„Sachzielbilanzen umfassen Datensammlung und Berechnungsverfahren zur Quantifizierung relevanter Input- und Outputflüsse eines Produktsystems“[65]*

Für eine umfassende Darstellung der ökologischen und ökonomischen Parameter der Nachhaltigkeit von Sortierung, Flotation und Dispergierung müssen Daten gesammelt, kategorisiert und zusammengetragen werden. Dies beinhaltet sämtliche Stoff- und Energieströme in dem zuvor festgelegten Bilanzraum. Durch die vorab festgelegte blockweise Untersuchung der einzelnen Produktionsabschnitte von Sortierung, Flotation und Dispergierung ist es möglich, die Datenmengen und den damit verbundenen Erfassungsaufwand zu begrenzen.

Die Erstellung der Sachzielbilanz unterliegt unter anderem den Kriterien der Stoffstromanalyse. Es empfiehlt sich diese in einem Stufenmodell zu durchlaufen und die Ergebnisse abschnittsweise festzuhalten, da diese jeweils als Eingabeinformation der nachfolgenden Stufe dienen. Dies ist in der folgenden **Tabelle 5** abgebildet.

Tabelle 5 Stufen der Stoff- und Energieflussanalyse [66]

#	Bezeichnung	Beschreibung	Anwendung
1	Festlegung des Untersuchungsgegenstandes	Ermittlung und Feststellung der Systemgrenzen; erste Übersicht über die Vorgänge und Stoffflüsse im Gesamtsystem	Gesamtsystem = Stoffaufbereitung Einzelssysteme = Feinsortierung, Vor- und Nachflotation, Dispergierung
2	Analyse und Struktur des Gesamtsystems	Übersicht über die Funktionen und Arbeitsprozesse im Gesamtsystem	Qualitative Erfassung der Stoff- und Energieströme durch Input-Output-Diagramme; wichtig: Allokationen
3	Festlegung der inneren Bilanzsysteme		Erfassung von allgemeinen Prozessdaten, wie herzustellendes Produkt, Hauptmaterialien, eingesetzte Energieträger, Abwasser, Emissionen
4	Prioritätensetzung für innere Bilanzsysteme	Vernachlässigung einzelner Vor- und Nebestufen eines Produktionsprozesses	Konzentration auf nachhaltigkeitsrelevante Prozesse
5	Aufstellung des Bilanzgleichungssystems	Ermittlung und Aufstellung von Bilanzgleichungen zur Abbildung des Untersuchungsgegenstandes	Ermittlung der Zusammensetzung von In- und Outputströmen
6	Festlegung abzuschätzender und zu messender Stoffströme	Angabe von Grenzen und Unsicherheiten um Vergleichbarkeit und Transparenz der Ergebnisse sicherzustellen	wichtig: Datenverfügbarkeit und Datenqualität
7	Festlegung des Bilanzzeitraumes	Örtliche, zeitliche und technologische Festlegung der Systemgrenzen	
8	Datenerhebung		auch hier: Allokation
9	Erstellung der Bilanzen	Lösung des Gleichungssystems welches sich aus den gemessenen und geschätzten Daten aus Schritt 5 ergibt	Zusammenfassung der Einzelbilanzen zu einem Gleichungssystem
10	Auswertung der technischen Ergebnisse		

---

Bei der Erstellung von Sachzielbilanzen fallen bei Input-Output-Analysen oftmals Allokationen ins Gewicht. Allokationen können anhand der Massenverhältnisse, des Energieanteils, exergetisch oder nach wirtschaftlichen Gesichtspunkten berücksichtigt werden [10]. Die Allokationen bei der Betrachtung von Feinsortierung, Flotation und Dispergierung werden insbesondere durch zugeführtes Verdünnungswasser verursacht, welches in den meisten Fällen in einem großen Tank bereitgestellt wird und von dort auf die Abnehmer verteilt wird. Die Volumenströme werden dabei nicht erfasst.

---

## **6.6 Wirkungsbilanz**

---

Laut DIN EN ISO 14040 dient die Wirkungsbilanz „der Beurteilung der Bedeutung potenzieller Umweltwirkungen mit Hilfe der Ergebnisse der Sachbilanz“ [65].

Um mögliche Umweltauswirkungen ermitteln zu können, werden einzelne Daten der Sachbilanz verschiedenen Umweltwirkungskategorien zugeordnet. Die Auswahl der Kategorien erfolgt zielgemäß in Kapitel 8.1.

Nach der Zuordnung der Input- und Outputdaten der Sachbilanz zu den einzelnen Wirkungskategorien erfolgt der zentrale Schritt der Wirkungsabschätzung, die sog. Charakterisierung. Hier werden die klassifizierten Daten mit Hilfe eines Modells in Wirkungsindikatoren umgerechnet und aggregiert.

---

## **6.7 Interpretation und Auswertung**

---

Im Rahmen der Interpretation werden die Ergebnisse der Sach- und Wirkungsbilanz gemeinsam betrachtet. Für diese Arbeit sind insbesondere der Aufbau und die Struktur der Modelle entscheidend. Die beprobten Versuchsanlagen weisen sowohl hinsichtlich ihrer Prozessstruktur als auch bezüglich der Einstellungen verschiedenster Anlagenparameter Unterschiede auf. Es gilt, den Aufbau der Modelle möglichst zu vereinfachen, um eine Vergleichbarkeit zwischen den Systemen herzustellen.



---

## 7 Aufbau der Stoffaufbereitungsanlagen

---

Für die Erstellung der Modelle ist die Verschaltung der einzelnen Aggregate im Altpapieraufbereitungsprozess zu bestimmen. Der Aufbau der Anlagen wird in den nachfolgenden Kapiteln dargestellt. Die am EU-Projekt REFFIBRE beteiligten Industriepartner werden dazu mit Unternehmen A und B anonymisiert. Die beiden hier vorgestellten Industriepartner sind namhafte europäische Hersteller für grafische Papiere.

---

### 7.1 Feinsortierung

---

In diesem Kapitel wird die Verschaltung der Feinsortierung in den beiden Unternehmen beschrieben. Die Feinsortierung ist nach der Vorflotation im Stoffaufbereitungsprozess angeordnet und hat die Abtrennung von Störstoffen zum Ziel.

---

#### 7.1.1 Anlage A

---

Die Feinsortierung in Anlage A ist in einem Mehrstufensystem in Kaskadenschaltung ausgelegt. Die Anlage besteht aus insgesamt drei Stufen, wobei die erste Stufe aus zwei parallel geschalteten Drucksortieraggregaten besteht, die Stufen 2 und 3 jeweils aus einem Drucksortierer. Der Aufbau des Mehrstufensystems ist in nachfolgender **Abbildung 17** dargestellt.

Es handelt sich in allen drei Stufen um Drucksortierer der Firma Voith mit Schlitzsiebkörben vom Typ C-Bar mit je 0,15 mm Schlitzweite. Die Drucksortierer 1 A und 1 B sind baugleich. Der Drucksortierer der Stufe 2 ist von geringerer Baugröße als Stufe 1. Die dritte Stufe der Feinsortierung in Anlage A ist ein MiniSorter. Dieser wird im folgenden Kapitel eingehend vorgestellt.

Zur Beprobung verfügt Anlage A über mehrere Entnahmestellen. Die Stellen, an denen Proben entnommen wurden, sind durch rote Punkte im Fließbild gekennzeichnet.

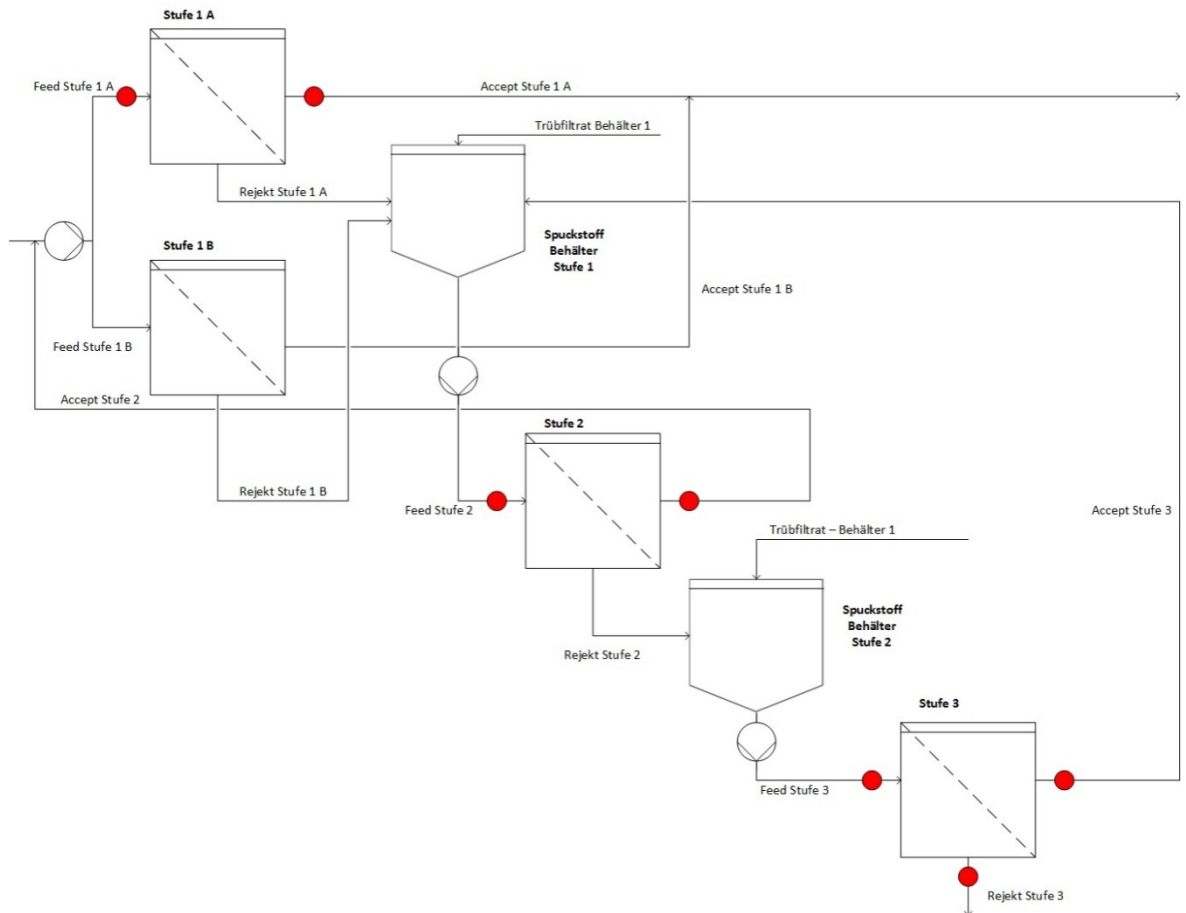


Abbildung 17 Feinsortierung Anlage A – Probenentnahmestellen

In einer zweiten Probenentnahme wurde zusätzlich der Drucksortierer der Stufe 1 B beprobt. Im Unterschied zur ersten Probenentnahme wurden jeweils Stichproben von Feed, Accept und Rejekt entnommen. Bei dem Drucksortierer der Stufe 2 kam es zu Unregelmäßigkeiten bei der Entnahme der Probe, so dass diese verworfen wurden und für die Modellierung auf die Messwerte der ersten Probenentnahme zurückgegriffen wurde. Die Prozessbedingungen waren zum Zeitpunkt der Probenentnahme weitgehend vergleichbar. Es können jedoch durchaus Unterschiede bei der Qualität des eingesetzten Altpapieres aufgetreten sein, sodass die Messwerte nur bedingt übertragbar bzw. zusammenführbar sind. Da die Messwerte der Glührückstandsbestimmung aus der zweiten Probenentnahme für die anderen Stufen recht nahe bei denen der ersten Probenentnahme liegen, wird angenommen, dass auch die anderen Messwerte weitgehend übertragbar sind.

In Anlage A sind drei induktive Durchflussmesser (IDM) verbaut. Die ersten beiden messen den Durchfluss im Zulauf vor der ersten Sortierstufe, der dritte IDM gibt einen Wert für den Durchfluss im Rejekt nach der dritten Sortierstufe aus. Aus **Abbildung 18** geht die Anordnung der Durchflussmessgeräte im Prozess detailliert hervor.

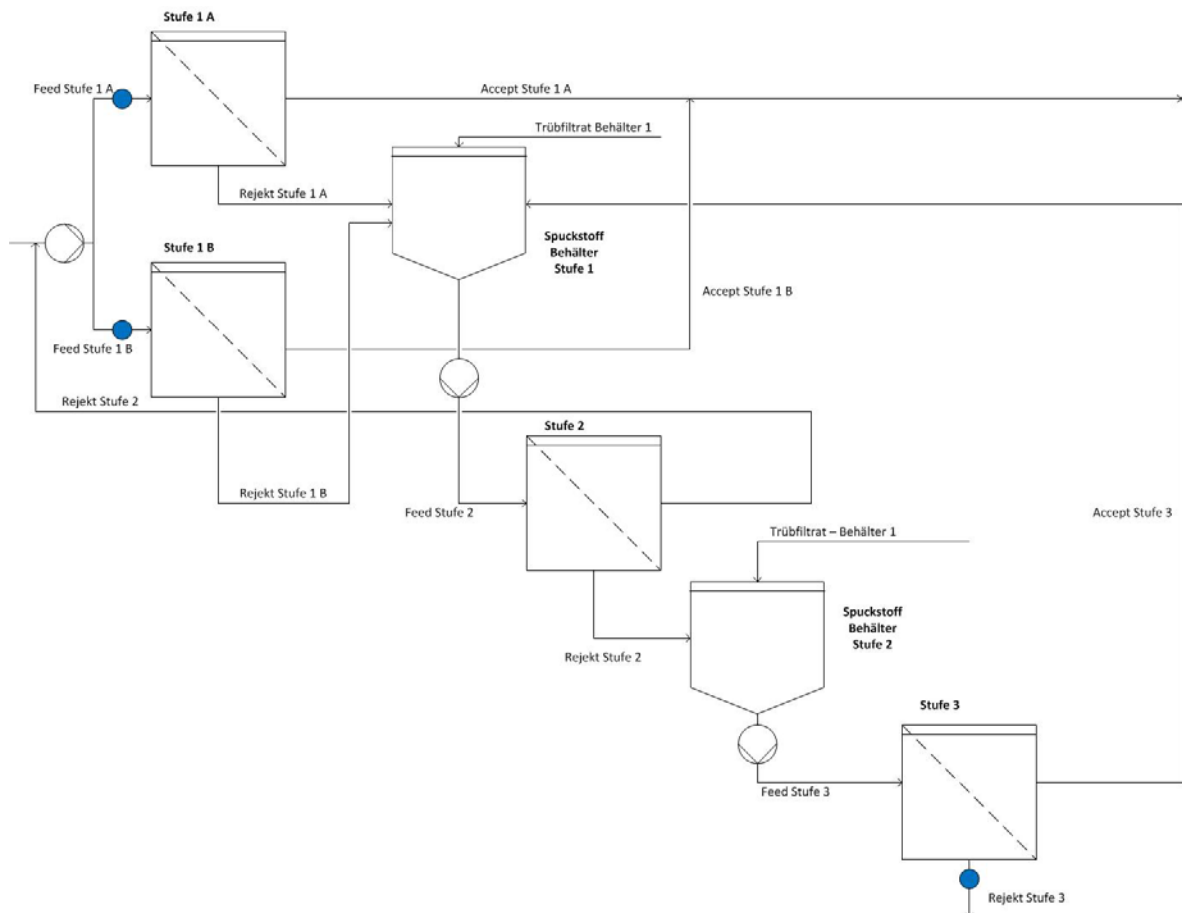


Abbildung 18 Feinsortierung Anlage A – Durchflussmessenrichtungen

### 7.1.2 Anlage B

Die zweite zu modellierende Feinsortieranlage B ist ebenfalls in einem Mehrstufensystem in Kaskadenschaltung ausgelegt. Ähnlich wie in Anlage A wird der Stoffstrom nach der Flotation in zwei gleich große Teilströme geteilt und zwei parallel geschalteten Schlitzsortieraggregaten (Stufe 1 A und 1 B) vom Typ MultiScreen MSS der Firma Voith zugeführt. Eine schematische Abbildung des Drucksortierers findet sich in **Abbildung 19**.

Der Drucksortierer ist durch ein zentrifugales Sortierprinzip charakterisiert. Alle Drucksortieraggregate der Anlage B arbeiten mit einem 0,15 mm Schlitzsiebkorb vom Typ C-Bar von Voith und einem MultiFoil-Rotor. Der Rotor ist zulaufseitig angebracht. Der Gutstoff dieser Sortierstufe wird, wie bei Anlage A, direkt dem Scheibenfilter zugeführt.

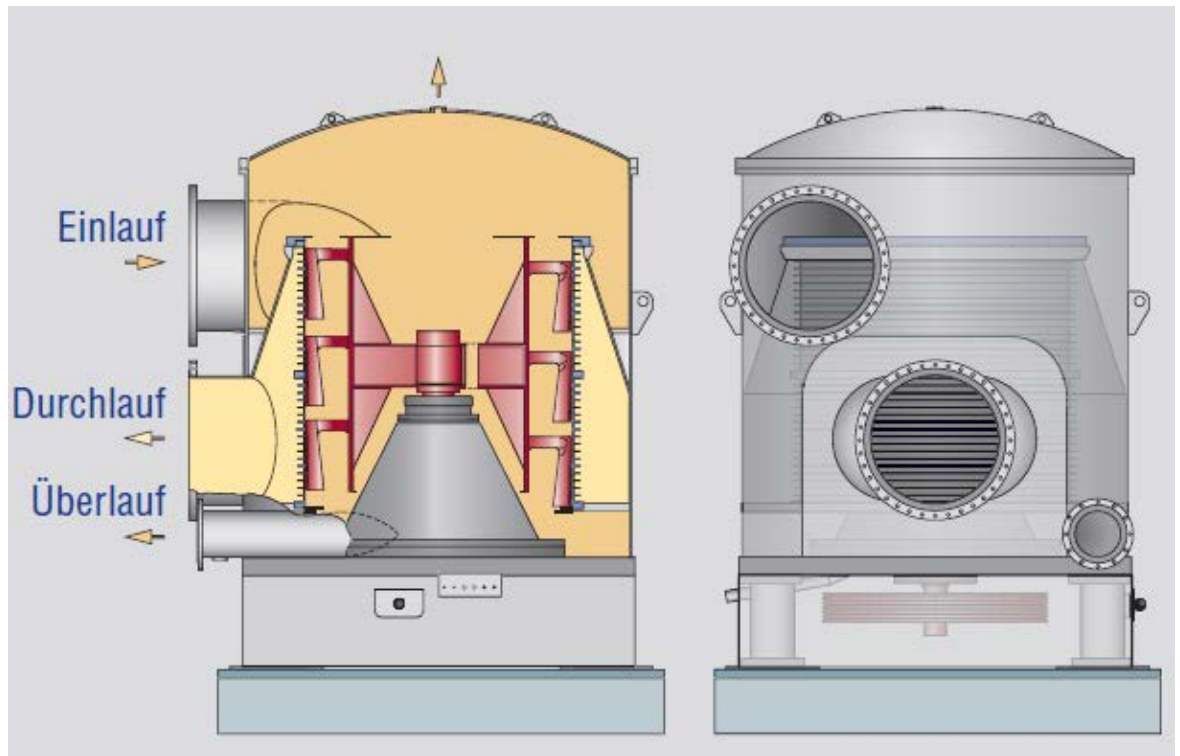


Abbildung 19 Drucksortierer MultiScreen MSS der Firma Voith [67]

Die zweite Stufe der Feinsortierung besteht aus zwei in Reihe geschalteten Schlitzsortierern (Stufe 2:1 und Stufe 2:2), ebenfalls vom Typ MultiScreen MSS der Firma Voith. Die Schlitzsortierung wird in Anlage B zudem durch eine dreistufige Cleaneranlage ergänzt, welche ebenfalls kaskadenartig verschaltet ist. Diese Cleaneranlage wird im Zuge der Modellierung vernachlässigt und lediglich der Zulauf (Feed) der ersten Cleaner Stufe (1), sowie das Rejekt der dritten Cleaner Stufe 2:2 untersucht.

Die dritte Stufe der Feinsortierung wird durch einen MiniSorter vom Typ MST der Firma Voith gebildet. Eine schematische Abbildung des MiniSorters findet sich in **Abbildung 20**.

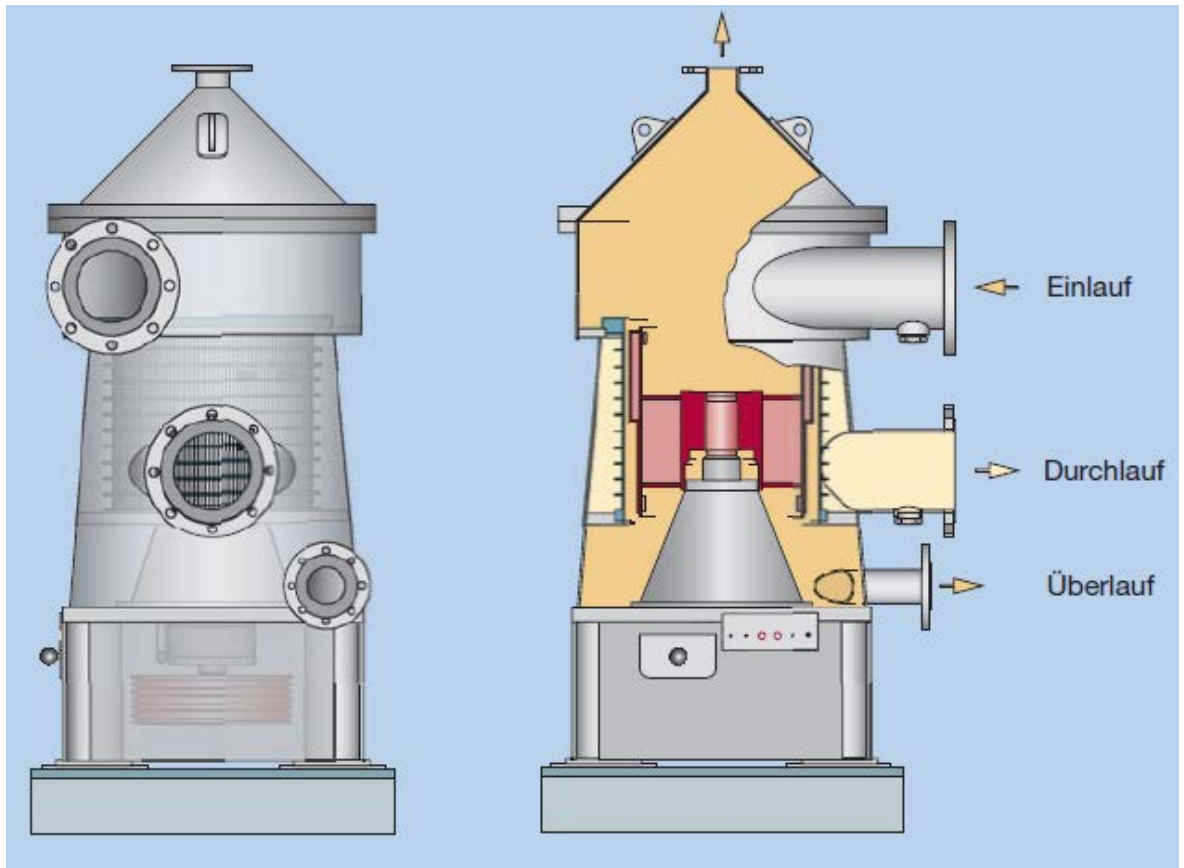


Abbildung 20 MiniSorter MST der Firma Voith [68]

In der folgenden **Abbildung 21** sind die Probenentnahmestellen einer ersten Probenentnahme durch rote Punkte im Prozessschaltbild gekennzeichnet. Auf die Darstellung von Pumpen und Verdichtern wurde aus Gründen der besseren Lesbarkeit verzichtet.

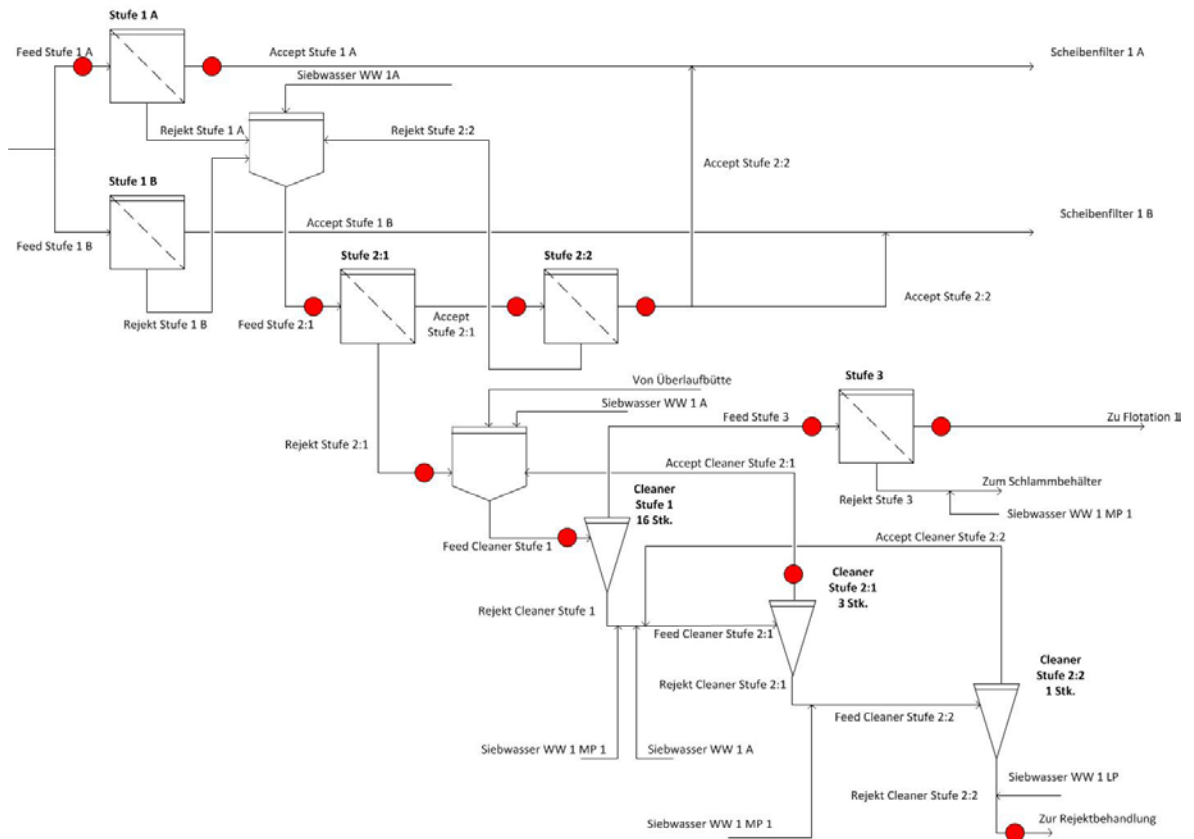


Abbildung 21 Feinsortierung Anlage B – Probenentnahmestellen Untersuchung 1

Bei einer zweiten Untersuchung der Altpapiersuspension wurde die Anzahl der Probeentnahmestellen erweitert, um die anschließende Prozessmodellierung zu vereinfachen. Es wurden zusätzlich Proben von den Rejekten der Stufe der 1 A, Stufe 2:2 und der Stufe 3 entnommen und analysiert. Des Weiteren wurden zu Prüfzwecken Proben des Siebwassers WW1A entnommen. Aus betriebstechnischen Gründen musste bei einer zweiten Probennahme auf Proben des Accepts der Cleaner Stufe 2:1 sowie des Rejekts der Cleaner Stufe 2:2 verzichtet werden. Die Anordnung der Probenentnahmestellen bei der zweiten Untersuchung ist **Abbildung 22** zu entnehmen.

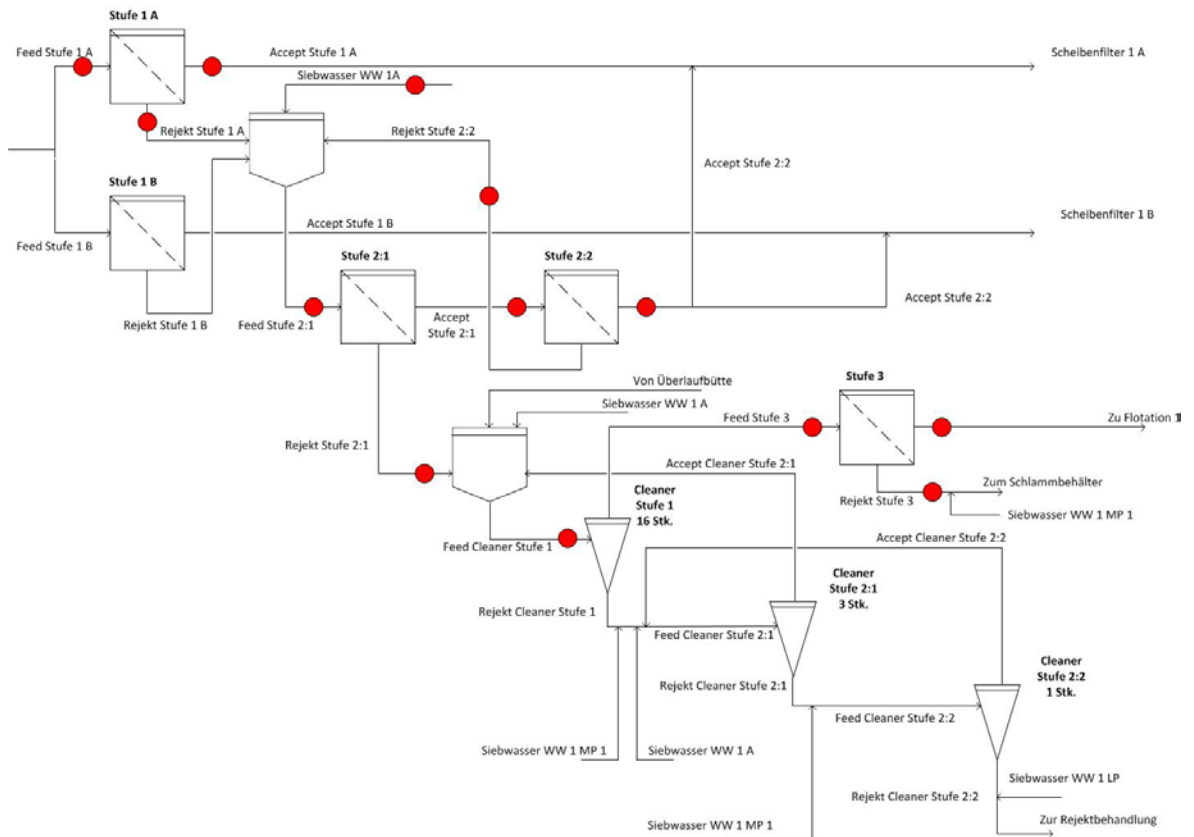


Abbildung 22 Feinsortierung Anlage B – Probenentnahmestellen Untersuchung 2

Anlage B verfügt ebenfalls über eine Erfassung und Protokollierung der Durchflussmesswerte. Die verbauten Mess- und Regeleinrichtungen sind in **Abbildung 23** dargestellt. Die blauen Punkte kennzeichnen verbaute Durchflussmesser. Im Gegensatz zu Anlage A befinden sich diese nicht Feed-seitig sondern auf Seiten des Accepts. In Anlage B ist es zudem möglich, die unbekannten Ströme anhand der Ventilstellungen abzuschätzen.

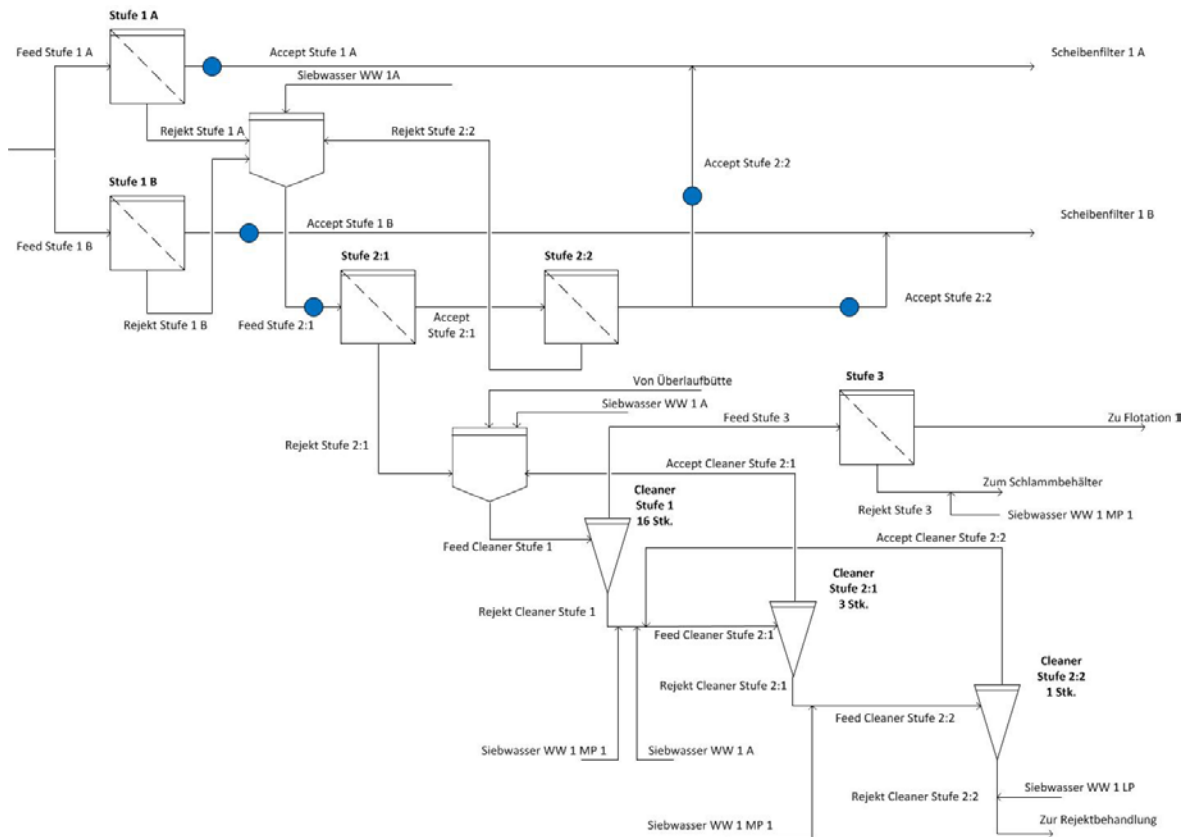


Abbildung 23 Feinsortierung Anlage B – Durchflussmesseinrichtungen

## 7.2 Flotation

In den anschließenden Unterkapiteln werden die Flotationsanlagen der beiden Fabriken A und B vorgestellt. Die Anlagen sind beide im „two-loop-design“ aufgebaut und verfügen über eine Vor- und Nachflotationsanlage mit diversen Rückführungen.

### 7.2.1 Anlage A

Die Deinking-Anlage bei Industriepartner A setzt sich aus insgesamt neun Zellen zusammen. Fünf Zellen bilden die Vorflotation und vier die Nachflotation. Die Vorflotation besteht aus vier Primärzellen und einer Sekundärzelle. Die Nachflotation ist aus drei Primärzellen und einer Sekundärzelle aufgebaut. In Abschnitt 7.2.1.1 und 7.2.1.2 wird der Aufbau der Anlage im Detail erklärt.



### 7.2.1.1 Vorflotation

Die Vorflotation von Anlage A besteht aus insgesamt fünf Zellen vom Typ Sulzer-Escher Wyss CF. Vier in Reihe geschaltete Zellen bilden die Vorflotation. Die erste und dritte Flotationszelle, sowie die zweite und vierte Zelle sind übereinander angeordnet. In den Zellen wird der Flotationsschaum mit Klarwasser zerschlagen und in den Schaumbehälter abgeführt. Das Rejekt der Vorflotation wird anschließend der Sekundärzelle Vorflotation zugeführt und erneut flотиert, um zuvor ausgeschleuste Fasern zurückzugewinnen. Das Accept dieser Sekundärzelle wird zum Teil vor die erste Zelle der Vorflotation zurückgeführt. Anschließend werden die Rejekte im Schlammbehälter und Schlammstapel gesammelt und von dort der Rejektverbrennung zugeführt. In **Abbildung 24** sind die Probenentnahmestellen durch rote Punkte gekennzeichnet.

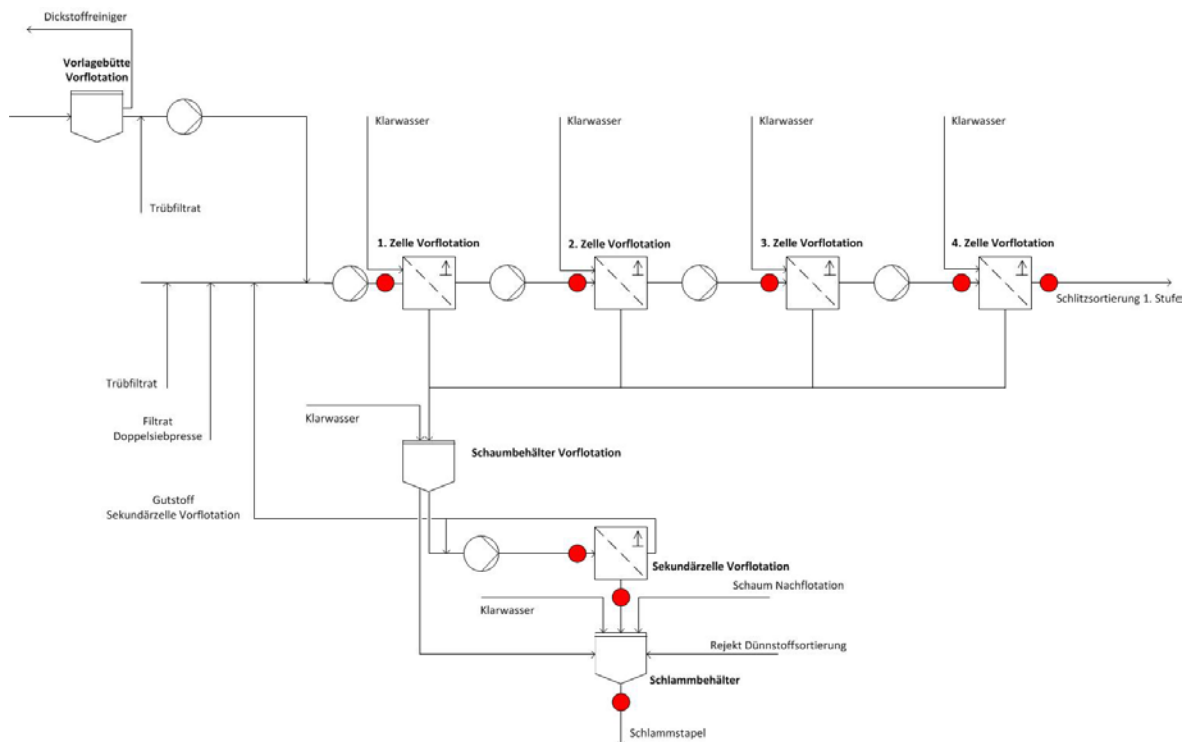


Abbildung 24 Vorflotation Anlage A – Probenentnahmestellen

Zur Regelung des Überlaufes der Flotationszelle werden zwei Messgrößen benötigt. Dies sind zum einen der Druck auf der Zulaufseite der Flotationszelle und zum anderen die acceptseitige Füllstandsmessung (LIC). Eine Durchflussmessung erfolgt im Zulauf zur ersten Zelle der Vorflotation und im Rejekt, das zum Schlammstapel gefördert wird. Die Anordnung ist in **Abbildung 25** abgebildet.

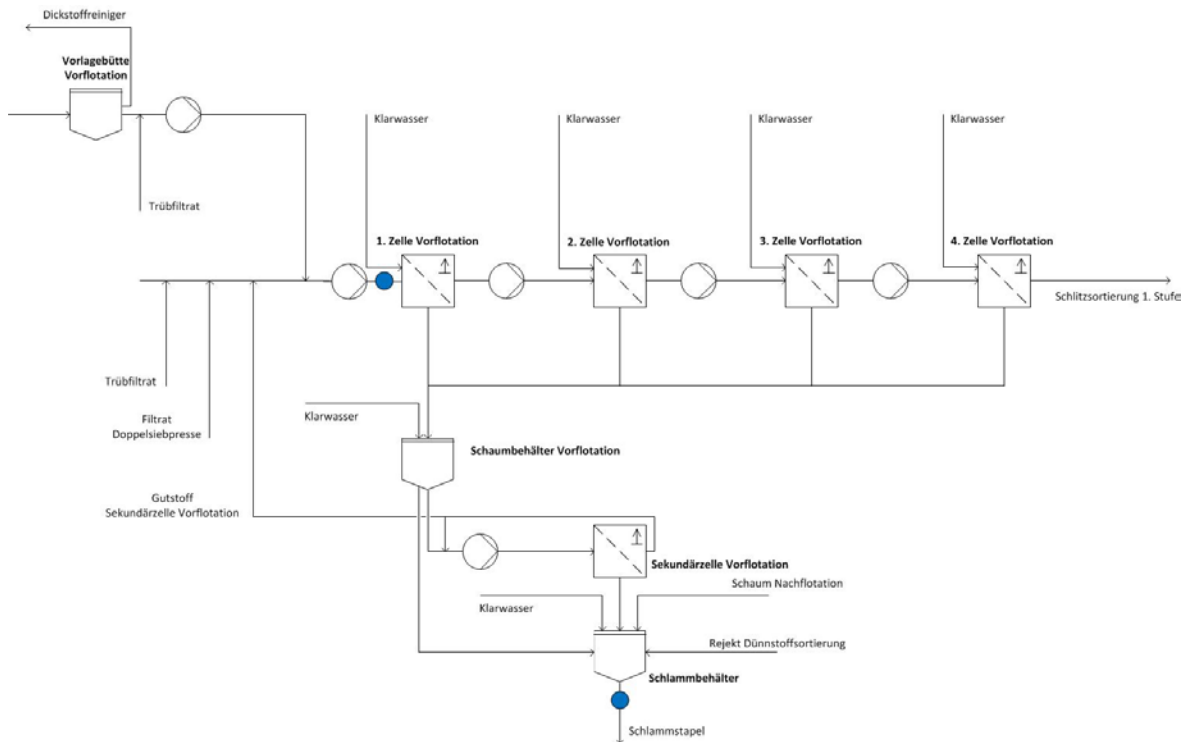


Abbildung 25 Vorflotation Anlage A – Durchflussmesseinrichtungen

### 7.2.1.2 Nachflotation

Die Nachflotation in Anlage A, wie sie in **Abbildung 26** abgebildet ist, besteht aus drei Zellen, welche in Reihe geschaltet sind. Der Gutstoff wird über eine Pumpe in die jeweils nächste Flotationszelle überführt. Nach der dritten Stufe wird die deinkte Altpapiersuspension zum Scheibenfilter gepumpt und dort eingedickt. Der Flotationsschaum gelangt über einen Schaumtrichter in einen Schaumzerstörer und von dort in den Schaumbehälter der Nachflotation. Die erste und dritte Zelle der Nachflotation sind übereinander angeordnet. Aus **Abbildung 27** geht die Anordnung der in der Nachflotation verbauten Durchflussmesser hervor.

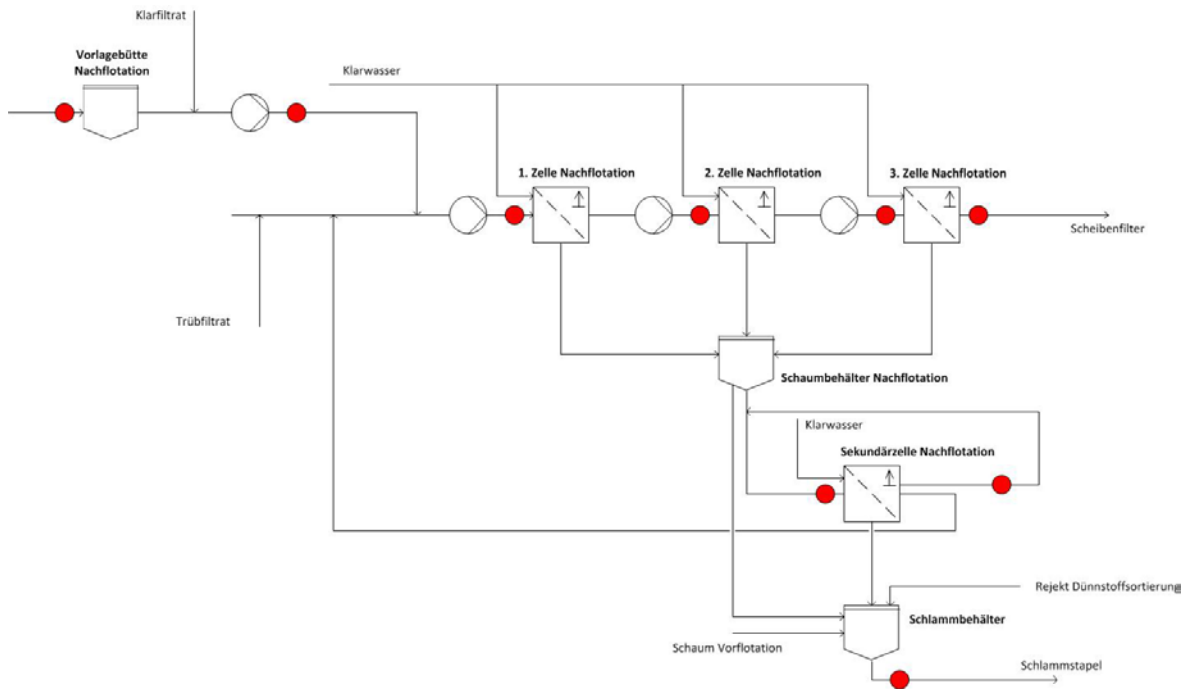


Abbildung 26 Nachflotation Anlage A – Probenentnahmestellen

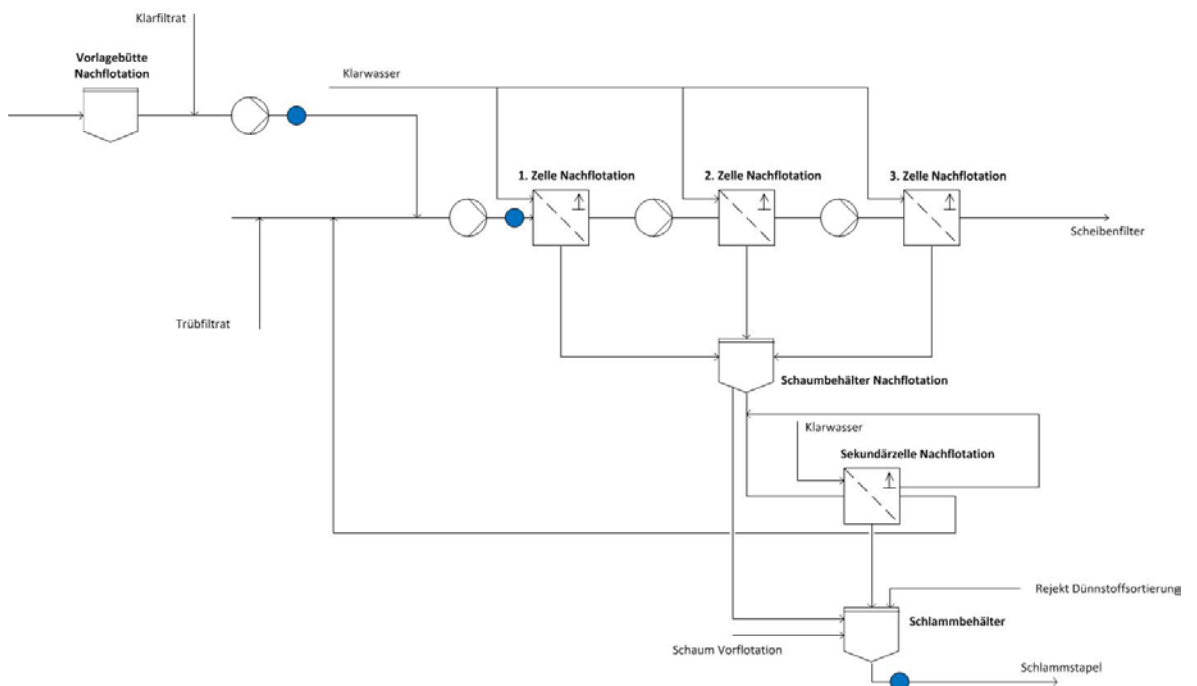


Abbildung 27 Nachflotation Anlage A – Durchflussmessenrichtungen

---

## 7.2.2 Anlage B

---

Die Anlage B gliedert sich, wie Anlage A, in Vor- und Nachflotation. Im Gegensatz zu Anlage A erfolgt die Flotation der grob gereinigten Altpapiersuspension in der neueren Flotationszelle vom Typ „EcoCell“ von Voith. Im Rahmen dieser Arbeit wurden keine Proben von Anlage B untersucht. Sie soll jedoch im direkten Vergleich zur Anlage A kurz vorgestellt werden.

---

### 7.2.2.1 Vorflotation

---

Die Papierfabrik nutzt eine Voith EcoCell Flotationseinheit mit sieben Zellen in der Primärflotation und vier Zellen in der Sekundärflotation. Der Aufbau ist in **Abbildung 28** ersichtlich. Der Schaumtransport wird durch das Spülen mit Klarwasser unterstützt. Der Schaum der Primärstufe wird durch drei Schaumzyklone niedergeschlagen und in einem Schaumbehälter gesammelt. Von dort wird der Schlamm in die Sekundärstufe gefördert und nochmals flотиert. Es erfolgt eine weitere Zwischenlagerung in einem Schlammbehälter, bevor die Deinking-Abfälle der Schlammentwässerung zugeführt werden.

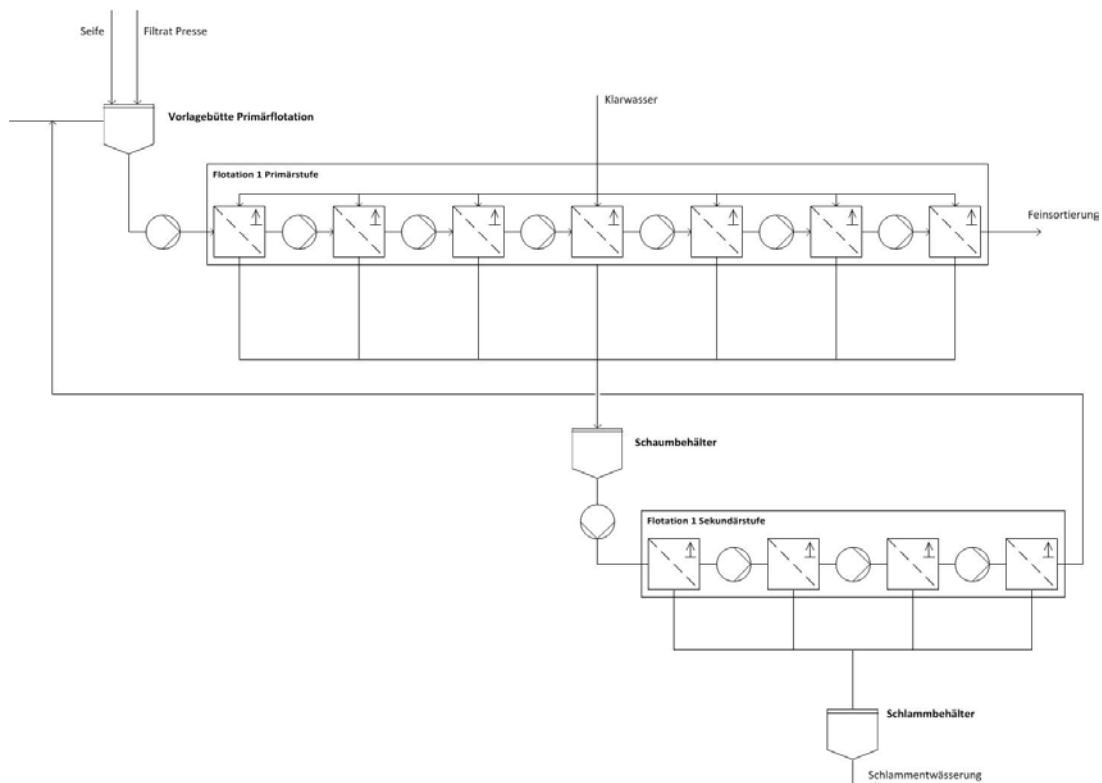


Abbildung 28 Vorflotation Anlage B

---

### 7.2.2.2 Nachflotation

---

Bei der Nachflotation in Anlage B handelt es sich ebenso wie bei der Vorflotationsanlage um eine Anlage vom Typ „EcoCell“. Die Primärstufe unterteilt sich in fünf Flotationszellen, die Sekundärstufe in zwei Flotationszellen. Die Anlage ist in **Abbildung 29** dargestellt. Der Schaum der Primärstufe wird durch zwei Schaumzyklone niedergeschlagen und im Schaumbehälter gesammelt. Zum besseren Abtransport des Schaums wird Filtrat zugesetzt. Der Schaum der ersten Stufe wird einer Sekundärstufe zugeführt und erneut flотиert. Die Rejekte der zweiten Stufe werden ebenso wie die Rejekte der Sekundärstufe der Vorflotation dem Schlammbehälter zugeführt.

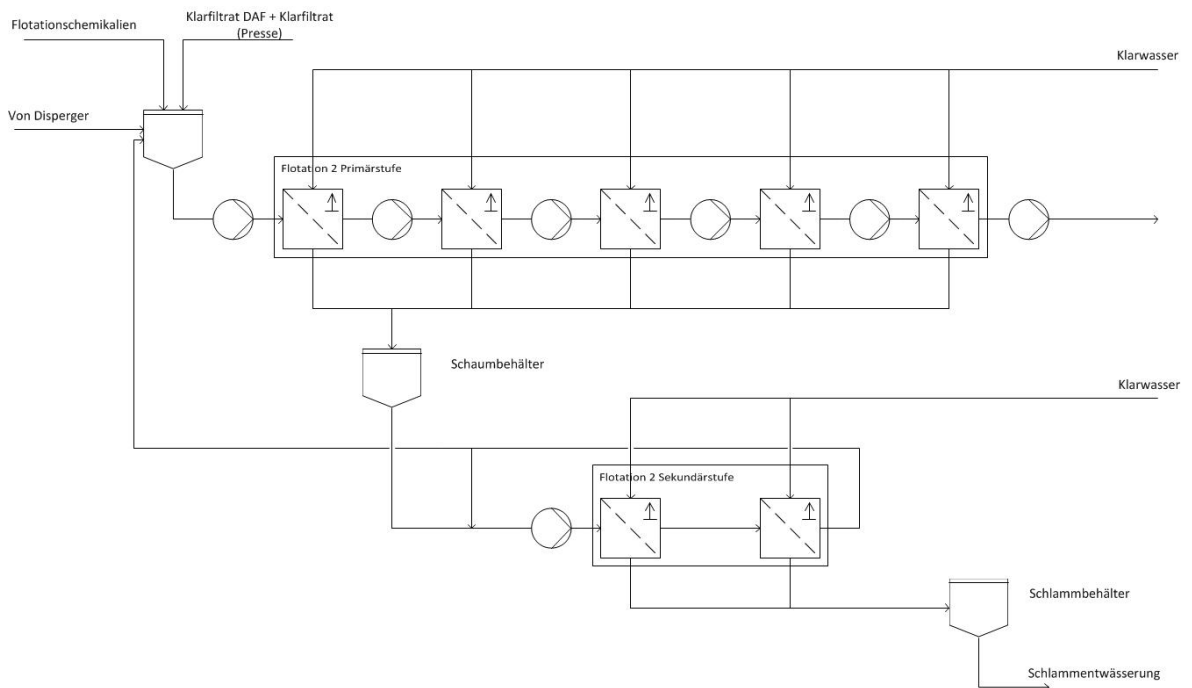


Abbildung 29 Nachflotation Anlage B

---

## 7.3 Dispergierung

---

Die Dispergierung stellt einen wichtigen Schritt in der Altpapieraufbereitung dar. Reststoffe und Stickies, die nicht in den vorhergehenden Prozessen aus dem Stoffstrom ausgetragen wurden, werden durch den Einsatz eines Dispergers so weit zerkleinert, dass sie nicht mehr sichtbar sind. Des Weiteren werden noch an den Fasern anhaftende Farbteilchen von der Faser gelöst, um diese in der Nachflotation aus der Suspension auszutragen.

---

Dies ist insbesondere für das Endprodukt aber auch für den Prozess der Papierherstellung sehr wichtig.

Im folgenden Unterkapitel 7.3.1 wird der Disperger in Anlage A vorgestellt. Für Anlage B wurden keine Untersuchungen der Stoffsuspension am Disperger durchgeführt.

---

### 7.3.1 Anlage A

---

Bei dem in Anlage A verbauten Disperger handelt es sich um einen Scheibendisperger HD4B der Firma Escher Wyss. Die maximale Kapazität des Dispergers liegt bei 420 Tagestonnen. Die spezifische Leistungsaufnahme bewegt sich zwischen 50 und 60 kWh/t, wobei die Altpapiersuspension mit einer Stoffdichte von etwa 35 % und einer Temperatur von etwa 80 °C in den Disperger einströmt und den Disperger mit einer Stoffdichte von etwa 25 %, bedingt durch den Einsatz von Verdünnungswasser, wieder verlässt.

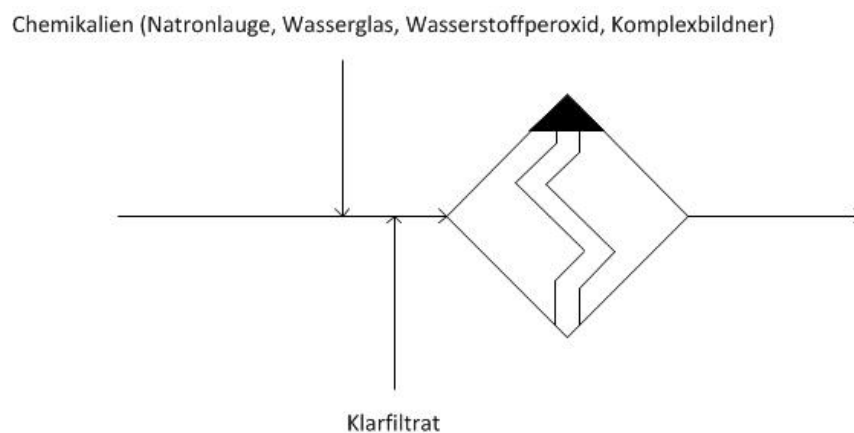


Abbildung 30 Anlage A Dispergierung

---

## 8 Versuchsdurchführung

---

Zur Erhebung von Messdaten wurden im Rahmen dieser Arbeit beide vorgestellten Anlagen umfangreich beprobt. So wurden von der Feinsortierung in Anlage A zweimal Proben entnommen, um das Modell der Anlage erstellen zu können. Die Feinsortierung der Anlage B wurde ebenfalls zweimal untersucht.

---

Dies ging auf speziellen Wunsch des Unternehmens zurück und diente in dieser Arbeit im Wesentlichen der Hervorhebung der Auswirkungen eines erhöhten Aschegehaltes im Altpapier auf das Modell. Die zweite Beprobung von Anlage B erfolgte jedoch in einem geringeren Umfang als die erste Untersuchung der Feinsortierung.

Von Anlage A wurde zudem die Flotationsanlage untersucht. Da die Vorflotation einen erheblicheren Einfluss auf die Entfernung von Druckfarbenpartikeln, Stickies und mineralische Füllstoffe hat, als die Nachflotation lag der Fokus dieser Ausarbeitung auf der Analyse der Vorflotation.

Abschließend wurde zudem die Dispergierung in Anlage A untersucht. Der Fokus dieser Messungen lag auf den optischen Untersuchungen und auf der Faserlängenverteilung.

Es wurden je Probe etwa 200 g otro Faserstoff für die Untersuchungen entnommen. Dies entspricht, je nach Stoffdichte des Ausgangsstoffes, etwa 20-30 Liter Suspension. Die Proben wurden dem Prozessverlauf entsprechend entnommen. Dies bedeutet, dass beispielsweise bei der Feinsortierung zunächst die erste Sortierstufe und anschließend die zweite und dritte Sortierstufe beprobt wurde. Eine zeitgleiche Entnahme aller Proben war aufgrund des großen Probenumfangs nicht möglich. Somit musste auf eine sequentielle Probenentnahme zurückgegriffen werden. Dadurch werden zusätzliche Schwankungen in den Messergebnissen verursacht.

---

## 8.1 Versuchsparameter

---

Im Rahmen des REFFIBRE Projektes wurden Parameter festgelegt, um die Charakteristika des rezyklierten Faserstoffs und des daraus herzustellenden Papierses zu definieren. Die Parameter, die eine Aussage über die Qualität des Faserstoffes treffen, sind in nachstehender **Tabelle 6** erfasst.

Tabelle 6 Parameter-Vektor zur Beschreibung der qualitativen Faserstoffeigenschaften

#				Characteristic	Symbol	Unit	Test method
1				Spec. Mass (otro)	w	g/m <sup>2</sup>	
2				Schopper-Riegler Value	SR	°	DIN ISO 5267-1
3				Water Retention Value	WRV	%	ISO 23714
4	Fibres	Morphological characteristics	Fines	Fines fraction (Mass share)	FS	%	PTS Method or McNett-Fractionation (R50, R200, D200) + Fiber Morphological Analyzer
5				Fibre length (Fines Fraction)	FLFS	µm	
6			Short fibres	Short fibre fraction (Mass share)	SF	%	
7				Fibre length (Short Fibre Fraction)	FLSF	µm	
8				Fibre width (Short Fibre Fraction)	WISF	µm	
9				Cell wall thickness (Short fibre fraction)	CWTSF	µm	
10			Long fibres	Long fibre fraction (Mass share)	LF	%	
11				Fibre length (Long Fibre Fraction)	FLLF	µm	
12				Fibre width (Long Fibre Fraction)	WILF	µm	
13				Cell wall thickness (Long fibre fraction)	CWTLF	µm	
14	Fibres	Physical characteristics		Stiffness	d		Data base
15				Elastic Modulus	Efib	GPa	
16				Shear Modulus	Gfib	Gpa	
17				Tensile Strength	FZ	MPa	Tappi T231
18				Bonding Strength	b	MPa	Data base
19				Spec. Light Scattering Coeff.	SFib	m <sup>2</sup> /kg	ISO 9416
20				Spec. Light Absorption Coeff.	KFib	m <sup>2</sup> /kg	
21				Lignin Content	LIG	%	NIR
22	Minerals			Minerals (as Ash 525°)	ASH525	%	ISO 1762
23				Spec. Light Scattering Coeff.	SFill	m <sup>2</sup> /kg	Data base
24				Spec. Light Absorption Coeff.	KFill	m <sup>2</sup> /kg	
25	Dirts			ERIC value	ERIC	%	INGEDE Method 2
26				Ink Detachment	ID	%	INGEDE Method 5
27				Specific Dirt Spec Area for Particles < 100 µm	ASD	mm <sup>2</sup> /m <sup>2</sup>	INGEDE Method 2
28				Specific Dirt Spec Area for Particles > 100 µm	ALD	mm <sup>2</sup> /m <sup>2</sup>	INGEDE Method 2
29				Spec. Light Scattering Coeff.	SInK	m <sup>2</sup> /kg	Data base
30				Spec. Light Absorption Coeff.	KInK	m <sup>2</sup> /kg	
31	Debris/ Stickys			Debris			
32				Large Stickys (> 1 mm)		mm <sup>2</sup> /kg	INGEDE Method 4
33				Medium Size Stickys (0.5 .. 1 mm)		mm <sup>2</sup> /kg	INGEDE Method 4
34				Small Stickys (<0.5 mm)		mm <sup>2</sup> /kg	INGEDE Method 4

Für die Beschreibung des erzeugten Papiers werden weitere Parameter herangezogen, welche in **Tabelle 7** zusammengefasst sind.



Tabelle 7 Parameter-Vektor zur Beschreibung der qualitativen Papiereigenschaften

#		<i>Characteristic</i>	<i>Symbol</i>	<i>Unit</i>	<i>Test method</i>
1	Mass/ Energy	Grammage (otro)	w	g/m <sup>2</sup>	ISO 536
2		spec. Energy Press Section	Wpress	kWh/t	
3		spec. Energy Drying Section	Wdry	kWh/t	
4	Structural	Apparent Density	AD	g/cm <sup>3</sup>	ISO 534
5		Roughness (PPS)	RPPS	µm	DIN ISO 8791-4
6		Porosity (Gurley)	PG	sec/100cr	ISO 5636-5
7	Mechanics	Tensile Index	T	Nm/g	DIN 1924-2
8		Tear Index	TI	mNm <sup>2</sup> /g	DIN EN 21974
9		Bending Stiffness (2 Point)	BS	Nmm	DIN 53121
10		Burst (Mullen)	BU	kPam <sup>2</sup> /g	DIN ISO 2758-86
11		SCT	SCT	kNm/g	DIN 54158
12	Optics	Brightness	R457	%	DIN 53145-T01-00
13		Opacity	O	%	ISO 2471

Für die vorliegende Arbeit ist zwecks der Modellierung der Stoffaufbereitungsprozesse nur ein Teil der Parameter von Bedeutung. Für das wasserbindende Verhalten der rezyklierten Papierfasern spielen insbesondere der Schopper-Riegler-Wert sowie das Wasserrückhaltevermögen eine wichtige Rolle. In diesem Zusammenhang ist auch eine Betrachtung der Faserdimensionen unerlässlich. Zweckmäßigerweise wird dazu eine Differenzierung in drei bzw. sechs Klassen vorgenommen. Die Differenzierung nach drei Klassen (Feinstoffe, Kurzfasern, Langfasern) ergibt sich durch die Faserstoffzusammensetzung, welche nach der Fiberclass-Methode des Kajaani Fiberlab ermittelt wurde. Eine Differenzierung in sechs Klassen (Splitter, R 30, R 50, R 100, R 200, D 200) erfolgt hingegen bei der Faser-Klassierung nach Haindl-McNett.

Das Trennverhalten im Sortierer lässt sich gut durch den Gehalt an Füllstoffen in der Fasersuspension annähern. Zu diesem Zweck wird der Glührückstand bei 525 °C in Anlehnung an ISO 1762 bestimmt. Ebenfalls unerlässlich für die Beschreibung des Trennverhaltens und auch zur Beschreibung der Effektivität eines Sortierers, ist die Bestimmung des Gehaltes an klebenden Stoffen, sog. Stickies. Die Maßeinheit für Stickies ist mm<sup>2</sup>/kg Faserstoffsuspension.

Eine weitere Größe, die die Qualität der Fasersuspension beschreibt, ist der Stippen- und Störstoffgehalt. Von einer Bestimmung des Stippengehaltes wurde im Zuge dieser Arbeit

jedoch abgesehen, da durch längere Transportwege und damit verbundene Standzeiten der untersuchten Faserstoffe keine statistisch relevante Aussage zu erwarten ist. Zur Untersuchung der optischen Papiereigenschaften wurden neben der Untersuchung von Nutschenblättern auch Laborblätter mit einer Grammatur von 45 g/m<sup>2</sup> herangezogen. Neben dem Farbart im L\*a\*b\*-Farbraum wurden die Helligkeit Y, der Weißgrad R457, der Wert R950 sowie der ERIC-Wert anhand von Nutschenblättern ermittelt. Die Ermittlung der K/S-Werte nach Kubelka-Munk und der Opazität sowie die Messung der Schmutzpunkte erfolgte anhand von Laborblättern mit einem Gewicht von (1,35 ± 0,05) g in Anlehnung an die INGEDE Methode Nummer 2.

Unter Berücksichtigung der ökologischen Nachhaltigkeitskomponente wurden zusätzliche Parameter definiert, um im weiteren Projektverlauf Rückschlüsse auf die Nachhaltigkeit der jeweiligen Stoffaufbereitungsprozesse ziehen zu können. Die Parameter sind in nachfolgender **Tabelle 8** verzeichnet werden jedoch im Zuge dieser Arbeit nicht weiter betrachtet.

Tabelle 8 Ökologische Parameter zur Beschreibung der Nachhaltigkeit

#	Characteristic	Symbol	Unit	Calculation method
1	Specific electricity consumption		MWh per ton	
2	Specific energy consumption (steam)		GJ per ton	
3	Specific fresh water consumption		m3 per ton	
4	Specific process water consumption		m3 per ton	
5	Specific chemicals consumption		kg per ton and type	

## 8.2 Faserfraktionierung nach Haindl-McNett

Zur Bestimmung des Splittergehaltes und der Faserzusammensetzung einer Faserstoffprobe wird die Methode der Faserfraktionierung nach Haindl-McNett herangezogen. Die Zusammensetzung einer Faserstoffsuspension ist von großem Interesse, da die Fasern mit verschiedenen Längenteilen auch unterschiedliche Beiträge zur Blattformation leisten. Des Weiteren ist insbesondere für altpapierverarbeitende Betriebe der Gehalt an Störstoffen von großer Wichtigkeit.

Die zeitgleiche Ermittlung des Störstoff- und Splittergehaltes und der Massenanteile der einzelnen Faserstofffraktionen ist mit einem Haindl-McNett Fraktionator möglich.

Die Faserstoffproben wurden in Anlehnung an das Zellcheming-Merkblatt V/1.4/86 fraktioniert. Der Aufbau der Apparatur ist in **Abbildung 31** dargestellt.

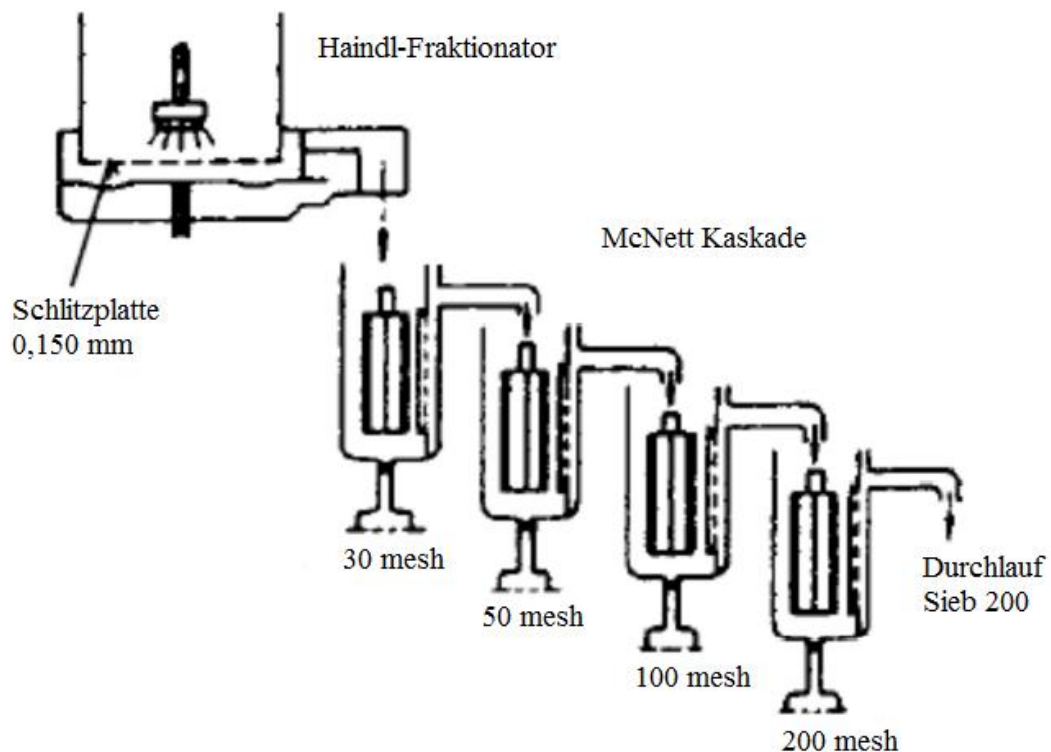


Abbildung 31 Schematischer Aufbau des Haindl-McNett Fraktionierers [69]

Der Haindl-McNett-Fraktionator besteht neben den Grundkomponenten-Fraktionierbehälter mit Schlitzzplatte und vier Fraktionierzellen mit Flögelrührern aus weiteren Komponenten wie z.B. Membranantrieb, Wasseranschluss und Absaugvorrichtung. Für die Fraktionierung kommen Siebe mit unterschiedlicher Maschenweite zum Einsatz, auf denen die einzelnen Faserfraktionen zurückgehalten werden. Auf der Schlitzzplatte des Haindl-Fraktionators, welche eine Schlitzzweite von 0,150 mm aufweist, bleiben die Störstoffe, wie beispielsweise Stippen, Splitter und größere Kunststoffteile zurück. Auf den Sieben der Fraktionierzellen mit einer Maschenweite von 30 und 50 mesh (Maschen pro Inch) werden die Fasern zurückgehalten, die in dieser Arbeit als Langfaserfraktion bezeichnet werden. Fasern, die von den beiden feineren Sieben (100 und 200 mesh) zurückgehalten werden, werden den Kurzfasern zugeordnet und der Rest, der alle Siebe passiert, wird als Feinstoff oder Durchlauf D bezeichnet.

---

Die Wahl der Siebe erfolgte anhand des Zellcheming-Merkblattes V/1.4/86. Ziel des Projektes REFFIBRE ist es unter anderem, anhand von sogenannten Testfällen, die Nachhaltigkeit eines papiererzeugenden Betriebes zu ermitteln und zu optimieren. Eines dieser Musterverfahren sieht die Ausschleusung einer Faserfraktion vor, welche keinen signifikanten Beitrag zu den Papiereigenschaften liefert und zu anderen Zwecken eingesetzt werden kann. Feinstoffe üben aufgrund ihres morphologischen Charakters einen großen Einfluss auf das Entwässerungsverhalten der Papiersuspension aus. Zudem leisten sie aufgrund ihrer kleinen Dimension nur einen geringen Beitrag zur Gesamtfestigkeit des Papiers. Durch die hohe mechanische Beanspruchung während des Stoffaufbereitungsprozesses, die die Entstehung von kürzeren Fasern und Feinstoffen begünstigt und vor dem Hintergrund eines möglichen anderweitigen Einsatzes der Feinstoffe, wurde die Entscheidung getroffen Siebe der Kategorien R 30, R 50, R 100 und R 200 einzusetzen, da auf diese Weise eine präzisere Ermittlung des Feinstoffgehaltes ermöglicht wird.

Die Versuchszeit wird laut Zellcheming-Merkblatt V/1.4/86 auf 20 Minuten begrenzt und eine Durchflussmenge von  $(10 \pm 0,2)$  l/min festgelegt. Für die Durchführung der Fraktionierung werden  $(10 \pm 0,05)$  g otro Faserstoff in 2000 ml Wasser benötigt.

---

### **8.3 Ermittlung fasermorphologischer Eigenschaften (Kajaani Fiberlab)**

---

In den vergangenen Jahren haben die optischen Methoden der Faseranalyse eine zunehmende Verbreitung gefunden. Eine Methode zur Ermittlung der fasermorphologischen Eigenschaften stellt die Messung mit dem FiberLab Analyzer der Firma Metso dar. Dazu wird eine stark verdünnte Faserstoffsuspension ( $\sim 0,002$  % Stoffdichte) durch eine Kapillare mit einem Durchmesser von 0,5 mm gepumpt und die Fasern einzeln von zwei CCD-Kameras analysiert.

Um eine Faser in der Kapillare zu erfassen, wird senkrecht zur Durchflussrichtung der Fasern in der Kapillare polarisiertes Laserlicht geschickt, das hinter der Kapillare auf einen Filter trifft. Der Filter zeichnet sich dadurch aus, dass er nur für Licht mit gedrehter Polarisationssebene durchlässig ist. Nicht gedrehtes Licht wird absorbiert. Ein hinter dem Filter angebrachter Längenmessungsdetektor erfasst das durchgelassene Licht und zeigt dadurch die Gegenwart einer Faser an.

Eine verbaute Xenon-Lampe blitzt, wenn die Faser in der Mitte des Optikbereichs angekommen ist. Dadurch erfassen die beiden CCD-Kameras je ein Bild der Faser in Längs- und in Querrichtung. Eine Bildverarbeitungssoftware verarbeitet die Bilder der Fasern und gibt die gemessene und projizierte Faserlänge, die Faserbreite und die Zellwanddicke sowie die Krümmung, die Querschnittsfläche und das Faservolumen aus. Zudem ist eine Bestimmung der Faserfibrillierung und des Feinstoffgehaltes möglich.

Mit Hilfe des Fiberclass-Tools erfolgt eine Klassifizierung der vermessenen Fasern in neun Klassen. Die Klassifizierung erlaubt eine massenbezogene und anzahlbezogene Aufschlüsselung der in der vermessenen Suspension enthaltenen Faserklassen. Die Klassen sind in nachfolgender **Tabelle 9** abgebildet. Eine weitere Zusammenfassung der Faserklassen ist möglich und kann ebenfalls der unten stehenden Tabelle entnommen werden. Die jeweils zusammengehörigen Faserklassen sind farblich gekennzeichnet.

Tabelle 9 Fiberclass Klasseneinteilung

1	Mehlstoff nicht bindungsfähig			
2	Fibrillen			
3	Kurzfaser fibrilliert			
4	Kurzfaser nicht fibrilliert		1	Feinstoffe
5	Kurzfaserbündel		2	Kurzfasern
6	Langfaser fibrilliert		3	Langfasern
7	Langfaser nicht fibrilliert			
8	Langfaser besonders dick			
9	Langfaserbündel			

Im Rahmen dieser Arbeit wurden jeweils die Ausgangsstoffe, die in den Fabriken entnommen wurden (diese werden nachfolgend als Gesamtstoff bezeichnet), sowie die Haindl-McNett-Fraktionen R 30, R 50, R 100 und R 200 mit dem Metso FiberLab geprüft. Zudem wurde die oben genannte Klassierung mit der Software Fiberclass durchgeführt und ist in den Auswertungen der Messergebnisse enthalten.

Für die Untersuchung der Haindl-McNett-Fraktionen R 30, R 50, R100 und R 200 wurden die getrockneten Filtrerrückstände der Fraktionierung über mehrere Tage in Wasser eingeweicht und im Labor-Desintegrator bei  $3000 \text{ min}^{-1}$  für 2 Minuten aufgeschlagen. Die Vermessung der Einzelfraktionen nach Haindl-McNett erfolgte lediglich bei der ersten Untersuchung der Proben der Feinsortierung. Im Anschluss wurde darauf aus zeitlichen Gründen verzichtet.

---

#### **8.4 Ermittlung des Glührückstandes bei 525 °C nach ISO 1762**

---

Bei der Herstellung von Papier kommen oftmals mineralische Pigmente und Füllstoffe zum Einsatz, um die Weiße eines Papiers zu erhöhen oder um etwa ein gewisses Flächengewicht zu erreichen. Auch Rückstände von Hilfsstoffen in der Papiererzeugung, wie beispielsweise Retentionsmittel, enthalten oftmals anorganische Bestandteile.

Zur Bestimmung des Glührückstandes wird eine Probe bei 525 °C in Anlehnung an ISO-Norm 1762 verascht und der bis zur Gewichtskonstanz verbliebene Glührückstand rückgewogen. Die Angabe des Glührückstandes erfolgt in Gewichtsprozent der klimatisierten Probe.

Die Aschegehaltsmessungen wurden mit einem Thermogravimetriemessgerät TGA 701 der Firma Leco durchgeführt. Bei Temperaturen von 525 °C zersetzt sich die Zellulose und das Wasser verdampft. Im Glührückstand liegt das Calciumcarbonat nahezu unversehrt vor.

Zur Ermittlung des Aschegehaltes wurden die zur Stoffdichtemessung genutzten aschefreien Filterpapiere mitsamt den Rückständen unter Luftatmosphäre nach vorgegebenen Heizungsstufen verascht.

---

#### **8.5 Bestimmung von Makrostickies nach INGEDE Methode Nr. 4**

---

Klebende Partikel, die im Altpapieraufbereitungsprozess oftmals zu Problemen führen, werden laut dem RECO-Fachausschuss des Vereins Zellcheming unter dem Oberbegriff der Stickies zusammengefasst. Eine Einteilung in Primär- und Sekundärstickies erlaubt eine Klassifizierung der Stickies nach der Herkunft. Primärstickies werden mit dem Rohstoff Altpapier in den Aufbereitungsprozess eingetragen, während Sekundärstickies durch chemisch-physikalische Wechselwirkungen während des Aufbereitungsprozesses entstehen.

Eine weitere Untergliederung der Stickies anhand ihrer Abtrennbarkeit unter Prüfbedingungen ist möglich. Das Trennkriterium stellt allgemein die Schlitzweite des Sortieraggregates der Laborsortierung dar. Diejenigen klebenden Rückstände, welche im Siebrückstand zurückbleiben stellen Makrostickies dar, während Mikrostickies die klebenden Bestandteile im Durchlauf definieren. In Zentrum dieser Arbeit steht die

---


Untersuchung von Makrostickies. Der Einfluss von Mikrostickies wird nicht berücksichtigt.

Zur Ermittlung des Gehaltes an Makrostickies haben sich neben der INGEDE-Methode Nr. 4 auch eine TAPPI- und eine ISO-Methode etabliert.

Die INGEDE-Methode 4 beschreibt einen Laborsortierungsprozess mit dem Ziel, den Siebrückstand derart zu präparieren, dass eine computergestützte optische Detektierung der Makrostickies möglich wird. Die Laborsortierung wurde mit einem Haindl-Fraktionator unter Verwendung einer 100 µm Schlitzplatte in Anlehnung an das Zellcheming-Merkblatt V/1.4/86 durchgeführt. Ein Waschwasser-Volumenstrom von zehn Liter pro Minute wurde eingestellt und die Hubfrequenz der Membran des Haindl-Fraktionators wurde auf 480 Doppelhübe/Minute festgelegt. Für die Fraktionierung wurden je 10 g otro Altpapiersuspension eingesetzt. In Ausnahmefällen, beispielsweise bei einer hohen Stickyfracht, wurde die Menge auf 5 g otro reduziert. Im Falle einer geringen Stickyfracht wurde die eingesetzte Menge auf 30 g otro erhöht. Die INGEDE-Methode Nr. 4 sieht eine Durchführung von mindestens drei Messungen vor. Es erfolgte je Probe jedoch lediglich eine Doppelbestimmung. Der eingesetzte Haindl-Fraktionator ist in **Abbildung 32** dargestellt.



Abbildung 32 Haindl-Fraktionator zur Bestimmung des Makrostickygehaltes in  
Deinkingstoffen



---

Die bildanalytische Auswertung erfolgte mit einem DOMAS 3.0 Scanner Advanced unter Verwendung der Software Optimate 6.5. Die Anpassung der unteren Messgrenze erfolgte entsprechend der bei der Sortierung verwendeten Schlitzplatte. Die weiteren Klassengrenzen wurden als kreisflächenäquivalente Durchmesser wie folgt festgelegt:

- 100  $\mu\text{m}$  – 199  $\mu\text{m}$
- 200  $\mu\text{m}$  – 299  $\mu\text{m}$
- 300  $\mu\text{m}$  – 499  $\mu\text{m}$
- 500  $\mu\text{m}$  – 599  $\mu\text{m}$
- 600  $\mu\text{m}$  – 999  $\mu\text{m}$
- 1.000  $\mu\text{m}$  – 1.499  $\mu\text{m}$
- 1.500  $\mu\text{m}$  – 1.999  $\mu\text{m}$
- 2.000  $\mu\text{m}$  – 2.999  $\mu\text{m}$
- 3.000  $\mu\text{m}$  – 4.999  $\mu\text{m}$
- 5.000  $\mu\text{m}$  – 9.999  $\mu\text{m}$
- 10.000  $\mu\text{m}$  – 49.999  $\mu\text{m}$
- 50.000  $\mu\text{m}$  – 200.000  $\mu\text{m}$

Das Messergebnis wird in  $\text{mm}^2$  Stickyfläche pro kg (otro) Sortiereintrag angegeben. Für die Berechnungen und die Modellierung wurde zusätzlich auch die Anzahl der vermessenen Stickies in den einzelnen Größenklassen berücksichtigt.



---

## 9 Ergebnisse und Diskussion

---

Nachfolgende Kapitel sind der Berechnung und Modellierung der Stoffaufbereitungsprozesse - Feinsortierung, Flotation und Dispergierung - in den betrachteten Anlagen gewidmet. Die wichtigsten Messgrößen, welche zur Modellierung herangezogen werden, wurden bereits in Tabelle 6 eingeführt, sollen aber an dieser Stelle noch einmal kurz wiederholt werden.


Für die Modellierung der ablaufenden Prozesse sind grundsätzlich der Volumendurchsatz und der Massendurchsatz von besonderer Bedeutung. Die Verknüpfung dieser beiden Größen erfolgt, wie bereits in Kapitel 5.1.1.3 beschrieben, über die Stoffdichte. Diese ist mit wenig Aufwand zu bestimmen und auch vor Ort in den Fabriken sowohl durch Online-Messverfahren als auch durch Stichprobenuntersuchungen messbar. Der Volumendurchsatz wird in den Fabriken an vielen Stellen kontinuierlich aufgezeichnet. Dennoch wird er nicht in allen Strömen erfasst. Die Anordnung der Durchflussmessgeräte in den einzelnen Fabriken und Prozessabschnitten wurde bereits in Kapitel 7 und den entsprechenden Unterkapiteln vorgestellt.

Weitere für die Berechnung und Modellierung der Stoffaufbereitungsprozesse relevante Messgrößen sind in nachfolgender **Tabelle 10** zusammengefasst. Der abgebildete Vektor wird nachfolgend als Suspensionsvektor bezeichnet.

Tabelle 10 Vektor zur Modellierung der Stoffaufbereitungsprozesse

<i>Characteristic</i>	<i>Symbol</i>	<i>Unit</i>	<i>Test method</i>
Schopper-Riegler Value	SR	°	DIN ISO 5267-1
Water Retention Value	WRV	%	ISO 23714
Long Fibre Fraction	R 30	%	McNett Fractionation (R 30, R 50, R 100, R 200)
Medium Size Fibres	R50	%	
Short Fibres	R 100	%	
Fibre Fines	R 200	%	
Minerals (as Ash 525°)	ASH525	%	ISO 1762
ERIC value	ERIC	%	INGEDE Method 2
Specific Dirt Spec Area for Particles < 100 µm	ASD	%	INGEDE Method 2
Specific Dirt Spec Area for Particles > 100 µm	ALD	%	INGEDE Method 2
Large Stickys (> 1 mm)		mm <sup>2</sup> /kg	INGEDE Method 4
Medium Size Stickys (0.5 .. 1 mm)		mm <sup>2</sup> /kg	INGEDE Method 4
Small Stickys (<0.5 mm)		mm <sup>2</sup> /kg	INGEDE Method 4

Für die Modellierung der ablaufenden Prozesse wurde das Programm Microsoft Excel aufgrund der breiten Verfügbarkeit eingesetzt. Dieses erweist sich jedoch für die Abbildung von bidirektionalen Prozessflüssen als ungeeignet. Dies zeigt sich insbesondere bei der Modellierung von Bütten, die als Puffer im Prozess eingesetzt werden, um Schwankungen auszugleichen. Es ist beispielsweise nötig, die sich rechnerisch aus den Prozessbedingungen der ersten Sortierstufe ergebenden Volumenströme als Eingang der nachfolgenden Sortierstufe vorzugeben, um eine Bilanzierung der zweiten Stufe durchführen zu können. Für gewöhnlich werden der Durchfluss einer Sortierstufe und damit der Förderstrom einer Pumpe anhand der Druckdifferenz im Drucksortierer geregelt. Im Falle einer Druckänderung wird der Durchfluss, also die Drehzahl der Kreislumpumpe, angepasst. Dies wiederum beeinflusst letztendlich den Füllstand in der vorgeschalteten Bütte. Dadurch werden die Ventilstellungen der Zuläufe der Bütten geregelt, da meist ein konstanter Füllstand in den Bütten angestrebt wird. Eben diese Prozesse lassen sich in Excel nicht oder nur mittels der Programmierung von VBA-Makros abbilden. In einem ersten Schritt soll auf diese Maßnahme verzichtet werden. Es werden jeweils die durch Stichprobenuntersuchungen ermittelten Werte des Zulauf-Vektors der einzelnen



---

Drucksortierer als Fix-Input vorgegeben. Durch diese Maßnahme ist es außerdem möglich, den Vektor des nicht vermessenen Trübfiltratstromes der ebenfalls in die Büten gefördert wird, mit Zahlenwerten zu besetzen. Für den Trübfiltratstrom und die Prozesse wurden weitere Annahmen getroffen. Diese werden im folgenden Kapitel eingehend betrachtet.

---

## 9.1 Betroffene allgemeine Annahmen

---

Für die Modellierung der Stoffströme müssen diverse Annahmen getroffen werden. Falls zusätzliche Annahmen notwendig sind, wird an entsprechender Stelle in den einzelnen Kapiteln darauf hingewiesen.

- Es treten keine Leckage- oder Verdunstungsverluste auf.
- Die Systeme werden als vollständig abgeschlossen betrachtet.
- Die Bilanzierung der Prozesse erfolgt unter der Beachtung der Massenerhaltung.
- Mit Filtraten werden keine oder nur geringe Mengen an Langfasern in das System zurückgetragen.
- Die Füll- und Feinstoffe im Prozesswasser verhalten sich bezüglich der Trennung in Trennprozessen wie reines Wasser.
- Für Füll- und Feinstoffe gilt des Weiteren folgende Formel:  $E_R = R R_V$ .
- Für eine erste Bilanzierung werden sämtliche aus Stichproben ermittelte Messwerte als nicht fehlerbehaftet angenommen und daher auf eine Berechnung der Fehlerfortpflanzung verzichtet.
- In den Flotationszellen werden sämtliche großen Bestandteile (Schlitzplattenrückstände, R 30-, R 50- Fraktion) mit dem Accept ausgetragen. Lediglich ein kleiner Teil der großen Komponenten findet sich im Flotationsschaum.

---

## 9.2 Aufbau der Modelle

---

Die Erstellung der Modelle teilt sich in zwei Schritte. Zunächst ist eine Aufnahme der Prozesszustände nötig. Zu diesem Zweck werden in einer Stichprobenuntersuchung an den beschriebenen Probenentnahmestellen sämtliche Größen des zuvor vorgestellten Suspensionsvektors ermittelt. Anhand dieser Messwerte ist anschließend für die Drucksortierung und die Flotation eine Berechnung der massenbezogenen Rejektrate  $RR_m$  sowie der Trenngrade  $E_{R,i}$  möglich. Die Trenngrade werden für jede Stoffkomponente  $i$  bestimmt. Aus massenbezogener Rejektrate und Trenngrad lassen sich anschließend die für jede Sortiermaschine charakteristischen Sortierkoeffizienten  $\alpha$  nach der Formel

$$E_R = RR_m^\alpha \quad (39)$$

bestimmen.

Bei der Auswertung der Messdaten der Flotation wird ähnlich verfahren. Es erfolgt jedoch nur eine Berechnung der Trenngrade. Die Rejektrate wird durch unterschiedliche Parameter geprägt, die bereits in Kapitel 5.2.2 beschrieben wurden. Auch die Fahrweise der Anlage trägt dazu bei, dass sich unterschiedliche Überlaufraten einstellen. Diese unterliegen je nach Qualität des eingetragenen Altpapieres auch vergleichsweise starken Schwankungen. Für die Flotation werden zusätzlich die Ausbeuten jeder einzelnen Flotationszelle bestimmt. Der Asche- und der Faseraustrag stellen hierbei die entscheidenden Kriterien dar.

Die Dispergierung beeinflusst stark die Fasereigenschaften und die optischen Charakteristika der Stoffsuspension. Daher werden morphologische Faserqualitätswerte, wie beispielsweise die Faserlänge oder der Fasercurl bewertet. Die Kalkulation der optischen Eigenschaften folgt dem gleichen Prinzip wie bei den zuvor genannten Auswertungen.

In einem zweiten Schritt wird die eigentliche Modellierung durchgeführt. Für die Sortierung werden die zuvor definierten charakteristischen Sortierkoeffizienten  $\alpha$  als „Fix-Input“ vorgegeben. Dies bedeutet, dass es sich um unveränderliche Parameter handelt, welche für jede Sortiermaschine einen bestimmten Wert annehmen. Des Weiteren werden auch die Parameter des Faserstoffqualitätsvektors des Zulaufs der ersten Stufe vorgegeben.

---

Die massenbezogene Rejektrate ist der veränderliche Parameter in den Modellen der Sortierung. Über die Veränderung der massenbezogenen Rejektrate lassen sich Unterschiede in der Faserstoffzusammensetzung in Accept und Rejekt feststellen.

Für die Flotation ergeben sich abhängig von der Betriebsweise der Anlage verschiedene Überläufe. Auch der Einsatz an Flotationschemikalien und die in den Pulper eingetragene Altpapierqualität haben großen Einfluss auf das Ergebnis der Flotation. Um das Flotationsergebnis beurteilen zu können, können unterschiedlichste Kriterien herangezogen werden. Die wichtigsten Werte für eine Papierfabrik stellen der Weißgradgewinn, sprich der Austrag der Druckfarben sowie die entstehenden Verluste dar.

Die Modelle sind für alle Trennprozesse der Stoffaufbereitung gleich aufgebaut. Im ersten Tabellenblatt der jeweiligen Excel Datei, welches im Folgenden als Übersichtsblatt bezeichnet wird, ist das Prozessschaltbild der Anlage dargestellt. Auf diesem Tabellenblatt erfolgt auch die Eingabe der Rejektraten und des Suspensionsvektors im Zulauf zur ersten Stufe. Zusätzlich können an den Büten Veränderungen bezüglich des Verdünnungswasserstromes vorgenommen werden. In den Stoffaufbereitungsanlagen erfolgt die Regelung des Verdünnungswasserstroms wie in Abschnitt 9 bereits beschrieben. In den Modellen kann dies durch die Programmierung eines VBA-Makros zu einem späteren Zeitpunkt der REFFIBRE Projektes realisiert werden.

Die weiteren Tabellenblätter stellen die Berechnungsblätter dar. Für jedes Trennaggregat, jede Bütte, jede Teilung oder Zusammenführung von Stoffströmen in Rohrleitungen wird ein eigenes Tabellenblatt verwendet. Auf diesen werden in den Zeilen die einzelnen Parameter des Suspensionsvektors abgebildet. Die Unterteilung der Spalten erfolgt nach folgendem Schema:

- Spalten A-E
  - Beschreibung des Parameters durch Bezeichnung und Einheit
  - Zum aktuellen Zeitpunkt sind drei von fünf Spalten frei. Dies ermöglicht Ergänzungen zu einem späteren Zeitpunkt des Projektes (Freigelassen wurden die Spalten A, D und E).

- 
- Spalten F-N
    - Abbildung der Input-Vektoren
      - Sortier-, Flotations- und Dispergierprozess: 1 Input-Vektor
      - Bütten: bis zu 4 Input-Vektoren
  - Spalten O-S
    - Abbildung der Output-Vektoren
      - Sortier- und Flotationsprozesse: 2 Output-Vektoren
      - Dispergierprozess: 1 Output-Vektor
      - Bütten: 1 Output-Vektor
  - Spalten T-Z
    - Abbildung der Trenngrade, der Rejektraten, der Ausbeuten und Verluste sowie der Sortierkoeffizienten  $\alpha$
  - Spalten AA-AZ
    - Durchführung der zugehörigen Berechnungen

Hervorzuheben ist, dass die Berechnungen von der Darstellung der Ergebnisse auf einem Tabellenblatt getrennt erfolgt. Dies trägt zur Reduzierung der Fehleranfälligkeit der Modelle bei, da sämtliche Eingaben getrennt von den Berechnungen erfolgen. Sämtliche Werte, an denen Veränderungen zugelassen werden, sind auf dem Übersichtsblatt abgebildet. Die Eingangswerte zur ersten Stufe der Sortierung und Flotation und die massenbezogene Rejektrate werden per Verweis (Beispielhafter Excel-Befehl: `=TabellenblattX!YI`) aus dem Übersichtsblatt entnommen. Selbige Funktion gilt auch für den Export von Datenwerten, beispielsweise wenn das Rejekt der ersten Sortierstufe den Zulauf der folgenden Sortierstufe darstellt und Werte automatisch von einem Tabellenblatt auf das nächste kopiert werden sollen. Diese Funktion lässt sich zusätzlich über die Programmierung eines VBA Makros vereinfachen.

Lediglich für die Dispergierung wird von dem ursprünglich beschriebenen Aufbau abgewichen. Da die Dispergierung keinen Trennprozess sondern einen Zerkleinerungsprozess darstellt, wird der Suspensionsvektor so verändert, dass er die

---

signifikanten Faserqualitätskenngrößen wie Faserlänge, Fibrillierung und Fasercurl enthält. Für die Modellierung werden die in Kapitel 5.3.3 beschriebenen Formeln verwendet.

In den nachfolgenden Kapiteln werden lediglich die Ergebnisse der Berechnungen und der Modellierung vorgestellt. Auf eine Abbildung der Excel Tabellen wird aufgrund des Umfangs der einzelnen Tabellenblätter verzichtet und auf den beigelegten Datenträger verwiesen. An passender Stelle werden in dieser Dokumentation jedoch Screenshots zum besseren Verständnis eingefügt.

---

### 9.3 Modellierung der Feinsortierung

---

Für die Erstellung der Modelle der Feinsortierung werden die in Tabelle 10 abgebildeten Parameter herangezogen. Zur Ermittlung der Faserzusammensetzung werden zum einen Daten aus der Haindl-McNett Fraktionierung erhoben. Des Weiteren werden die Stoffe einer Untersuchung mit dem Kajaani FiberLab unterzogen und eine Auswertung mit dem Tool „FiberClass“ durchgeführt. Problematisch gestaltet sich an dieser Stelle der Vergleich zwischen den Messdaten. Während die Haindl-McNett Fraktionierung eine Klassierung in vier bzw. sechs Kategorien vornimmt (Schlitzplattenrückstände, R 30, R 50, R 100 und R 200), erfolgt bei der Auswertung der Messdaten des Metso FiberLab eine Aufteilung der Fasern in neun bzw. in drei reduzierte Kategorien (Langfaser, Kurzfaser und Feinstoffe). Zu beachten ist jedoch, dass insbesondere Feinstoffe durch das FiberLab-Messgerät unzureichend erfasst werden.

Für die Abbildung der Feinsortierung sind neben den unterschiedlichen Massenanteilen der Faserkategorien auch der Glührückstand der einzelnen Proben sowie der Stickygehalt von Bedeutung. Sie liefern entscheidende Angaben zur Trennwirkung der Sortieraggregate. Die Ergebnisse der Stickyabscheidung sind jedoch nur bedingt aussagekräftig, da sie starken Schwankungen unterliegen. Außerdem ändert sich die Stickyverteilung infolge von Transport- und Lagerungsbedingungen. Aus diesem Grund kann keine allgemeingültige Aussage anhand einer Stichprobe getroffen werden. Die grundlegenden Größen werden jedoch ermittelt und dokumentiert.

Vor der Modellierung der Schmutzpunkte, der Schopper-Riegler-Werte und des Wasserrückhaltevermögens wird auf die Korrelationsanalyse zurückgegriffen, um festzustellen, ob ein grundlegender Zusammenhang zwischen dem betrachteten Parameter

---

und der Faserstoffzusammensetzung besteht. Beispielhaft wird hier der Zusammenhang für Anlage B verdeutlicht. Zwischen dem Aschegehalt in Feed, Accept und Rejekt und der rechnerischen Fraktion P 200 besteht eine sehr hohe Korrelation ( $r_{xy} > 0,9$ ), wohingegen zwischen dem Aschegehalt und der Fraktion R 200 nur eine sehr geringe Korrelation besteht ( $r_{xy} = 0,23$ ). Zwischen dem Aschegehalt in Feed, Accept und Rejekt und dem Schopper-Riegler-Wert besteht eine mittlere Korrelation ( $r_{xy} = 0,85$ ), während zwischen dem Aschegehalt und dem Wasserrückhaltevermögen eine negative mittlere Korrelation ( $r_{xy} = -0,66$ ) besteht. Aus diesem Grund basiert die Modellierung der Schopper-Riegler-Werte und des Wasserrückhaltevermögens auf dem Zusammenhang zum Aschegehalt. Eine ähnlich hohe Korrelation ergibt sich auch zwischen der P 200-Haindl-McNett-Fraktion und dem Schopper-Riegler-Wert sowie dem Wasserrückhaltevermögen. Dabei ergibt sich beim Schopper-Riegler-Wert eine etwas bessere Korrelation ( $r_{xy} = 0,84$ ) als beim Wasserrückhaltevermögen ( $r_{xy} = -0,66$ ). Die Modellierung gestaltet sich bei der bisher geringen Datenlage dennoch schwierig, da zwischen den einzelnen Sortieraggregaten starke Schwankungen auftreten.

---

### 9.3.1 Anlage A

---

In Anlage A sind lediglich zwei Durchflussmesser eingebaut. Diese messen den Durchfluss im Zulauf zur ersten Sortierstufe sowie den Durchfluss im Rejekt der dritten Sortierstufe, vgl. dazu Abbildung 18. Um eine Aussage über die Wirksamkeit einer Sortieranlage treffen zu können, ist eine Erfassung aller Stoffströme notwendig. Eine Durchflussmessung vor Ort mit dem Ultraschall-Durchflussmessgerät Controlotron System 1010 wurde jedoch ergebnislos abgebrochen, da eine Vermessung feststoffbeladener Ströme mit diesem Messgerät nicht möglich ist. Auch eine Vermessung der Stoffströme in der Feinsortierung mit einem fabrikeigenen Messgerät blieb ergebnislos.

Eine erste Beprobung der Feinsortierung, bei der lediglich Feed und Accept der drei Stufen beprobt wurden, erwies sich zudem aufgrund der fehlenden Verfügbarkeit von Durchflussmessungen und der fehlenden Daten zu den Rejekten der ersten und zweiten Sortierstufe als nicht modellierbar. Nach einer zweiten Probenentnahme wurden zudem jeweils die Ströme von Feed, Accept und Rejekt der drei Sortierstufen vermessen. Dies ermöglicht eine umfassendere Auswertung der drei Sortierstufen als zuvor und eine erste Berechnung ist möglich.



---

Dennoch beeinflussen die fehlenden Durchflussmessungen die Berechnungen. Insbesondere die Berechnung der zweiten Sortierstufe beruht auf mehreren Annahmen, welche mit einer Probenentnahme nicht ausreichend geprüft werden können.

Da für die erste Sortierstufe lediglich der volumetrische Durchsatz des Zulaufs sowie die Stoffdichten und Ascheanteile von Feed, Accept und Rejekt bekannt sind, werden zwei Gleichungen für das Sortieraggregat aufgestellt.

$$\dot{m}_F = \dot{m}_A + \dot{m}_R \quad (40)$$

$$\dot{m}_F * w_{Ash,F} = \dot{m}_A * w_{Ash,A} + \dot{m}_R * w_{Ash,R} \quad (41)$$

Die Gesamtstoff-Massenbilanz (Gleichung 40) und die Glührückstands-Massenbilanz (Gleichung 41) über ein einzelnes Drucksortieraggregat ermöglichen die Berechnung der Volumenströme von Accept und Rejekt. Über die bekannten Stoffdichten lassen sich auch die Massenströme von Accept und Rejekt bestimmen. Die in der Fasersuspension mitgeführten mineralischen Füllstoffe und Pigmente verhalten sich unter idealen Bedingungen im Drucksortieraggregat wie Wasser und teilen sich somit nach den Bedingungen der volumenbezogenen Rejektrate auf. Dies bedeutet, dass für den Glührückstand der Trenngrad und die volumenbezogene Rejektrate übereinstimmen müssen. Das selbige Verhalten zeigt sich auch für rechnerische P 200-Fraktion der Haindl-McNett-Fraktionierung.

Für den Drucksortierer 1 A kommt es bei beiden Probenentnahmen zu einer Eindickung von Accept und Rejekt. Dies ist für gewöhnlich nicht der Fall. Als Ursache werden

- eine Schwankung im Prozess zwischen den beiden Probenentnahmen,
- ein Fehler bei der Probenentnahme,
- ein ungünstig angebrachter Probenentnahmehahn oder
- ein Fehler bei der Stoffdichtebestimmung vermutet.

Bei der Berechnung des Rejekt-Volumenstroms fallen daher bei der weiteren Berechnung ebenfalls Unstimmigkeiten auf. So beträgt der Volumenstrom, wenn er anhand des Glührückstandes berechnet wird 4935 l/min. Eine Berechnung anhand der Fiberclass-

---

Daten ergibt einen Volumenstrom von 1425 l/min. Dadurch liegen sowohl die massen- als auch die volumenbezogene Rejektrate für diese beiden Messungen für Sortierer 1 A weit auseinander ( $RR_{m, \text{ Feinstoff}} = 9,69 \%$ ,  $RR_{m, \text{ Glührückstand}} = 33,56\%$ ). Somit lässt sich für Sortierer 1 A anhand der einfachen Probenentnahme keine verlässliche Berechnung durchführen.

Für Drucksortierer 1 B ergibt sich ein anderes Bild. Hier liegen die aus dem Glührückstand und dem Feinstoffgehalt ermittelten Volumenströme sehr nah beieinander. Die Rejektrate für das Sortieraggregat 1 B liegt bei 12 % und ist damit wesentlich realitätsnäher. Da es sich bei Drucksortierer 1 A und 1 B um baugleiche Modelle handelt, werden für die Modellierung der Prozesse die Daten von Drucksortierer 1 B auch für den Drucksortierer 1 A angesetzt. Im Gegenzug werden die für Drucksortierer 1 A ermittelten alpha-Werte für die Haindl-McNett-Fractionen und die Stickyabtrennung auch für Drucksortierer 1 B eingesetzt, da anzunehmen ist, dass es sich bei dem einströmenden Altpapiersuspensionsstrom um einen Strom derselben Zusammensetzung handelt, welcher zuvor lediglich einer volumetrischen 50:50 Aufteilung unterzogen wurde und die Komponenten dementsprechend einer gleichartigen Rückhaltung im Drucksortierer unterliegen.

Die Stickymessung sowie die Haindl-McNett-Fraktionierung wurden bei Anlage A lediglich für Drucksortierer 1 A durchgeführt und zeigen durchaus plausible Werte. Große Stickies werden optimal abgeschieden, sodass im Accept lediglich mittlere und kleine Stickies zurückbleiben.

Die Fiberlab-Messungen zeigen, dass sich sämtliche Faseranteile gleichartig auf Accept und Rejekt aufteilen. Auffällig bei den Sortieraggregaten 1 A und 1 B ist jedoch, dass sich sowohl Feinstoffe als auch Langfasern im Accept anreichern. Dies ist möglicherweise darauf zurückzuführen, dass das Fiberlab-Messgerät Feinstoffe nicht vollständig erfasst.

Eine Berechnung der Sortierstufe 2 ist ohne die Angabe der ein- und austretenden Volumen- und Massenströme nicht möglich. Zudem ist der Trübfiltrat-Volumenstrom, der in die vorgeschaltete Bütte einströmt vollkommen unbekannt. Daher werden zunächst alle unbekannten Messgrößen für Sortierstufe 3 ermittelt. In der zweiten Probenentnahme kam es dabei zu einem Fehler bei der Probenentnahme oder einem Messfehler. Erneut kommt es zu einer Eindickung des Accepts und des Rejekts. Dieser Fehler bewegt sich jedoch im

---

Rahmen der Standardabweichung der Doppelbestimmung der Stoffdichten. Der sich aus den gemessenen Aschegehalten ergebende Volumenstrom für den Zulauf erweist sich außerdem als nicht realitätskonform. Es ergibt sich eine zu hohe massenbezogene Rejektrate, die nicht mit der Realität übereinstimmt. Aus diesem Grund müssen in weiteren Stichprobenuntersuchungen die Stoffdichten möglichst präzise festgestellt werden. Dies gilt auch für die Volumenströme. Damit ist die Ermittlung der fehlenden Werte für Stufe 2 zu diesem Zeitpunkt des Projektes nicht möglich. Da weder für die zweite noch für die dritte Sortierstufe in Anlage A eine Berechnung der maschinenspezifischen alpha-Werte möglich ist, kann aktuell auch keine Modellierung des Feinsortierungsprozesses durchgeführt werden. Eventuell ist im weiteren Projektverlauf eine Ermittlung der Durchflüsse anhand der Ventilstellungen in der Feinsortierung sowie über die Drehzahl der Kreislumpen möglich. Für die Betrachtung eines Betriebspunktes kann angenommen werden, dass die Drehzahl der Kreislumpe dem Durchfluss proportional ist. In der Kürze der Zeit waren jedoch keine Daten verfügbar, um diese Berechnungen durchzuführen.

---

### **9.3.2 Anlage B**

---

Bei Anlage B werden im Gegensatz zu Anlage A die Volumenströme im Accept der ersten Stufe und im Accept von Stufe 2:2 kontinuierlich mittels induktiver Durchflussmesser aufgezeichnet. Diese stellen auch die Ströme dar, welche direkt zum Scheibenfilter gefördert werden. Zudem lässt sich über die Ventilstellungen und die Pumpendrehzahl der Volumenstrom im Accept des Drucksortierers der Stufe 3 abschätzen. Bei diesen vier Aggregaten werden außerdem, ebenfalls über die Ventilstellung und die Pumpendrehzahlen, Daten der Volumenströme im Rejekt erhoben. In Stufe 2:1 wird neben dem Volumenstrom des Rejekts auch der Volumenstrom im Zulauf bestimmt. Über die Kenntnis der Volumenströme in zwei von drei Strömen und der ermittelten Stoffdichten in Feed, Accept und Rejekt lässt sich unter Beachtung der Massenerhaltung der dritte (noch unbekannte) Stoffstrom berechnen.

Eine erste Probenentnahme in dieser Anlage, bei der, wie in Anlage A, lediglich Proben aus Feed und Accept der einzelnen Sortierer untersucht wurden, erwies sich ebenfalls als unzureichend und für die Berechnung und Modellierung der Prozesse wenig aussagekräftig.

Die Berechnung erfolgte unter Nutzung der in Kapitel 5.1.1.3 eingeführten Formeln. Zunächst wurden anhand der erhobenen Messdaten für die einzelnen Sortieraggregate die massenbezogenen Rejektraten, die Trenngrade sowie der Koeffizient  $\alpha$  für die einzelnen Komponenten der Stoffsuspension ermittelt.

[illegible]

## 9. Ergebnisse und Diskussion

violet green black		online measurement sampling calculated values		
<b>Feed Stage 1 A</b>		<b>mean</b>		
volumetric flow rate	l/min	36549,30		
consistency	%	1,66		
mass flow rate	kg/min	607,81		
<b>Fiberclass</b>				
finest	%	13,10	kg/min	79,62
short fibres	%	50,17	kg/min	304,92
long fibres	%	36,27	kg/min	220,43
<b>Haindl-McNett</b>				
slotted plate	%	0,23	kg/min	1,40
sieve 30	%	14,77	kg/min	89,77
sieve 50	%	10,49	kg/min	63,76
sieve 100	%	14,77	kg/min	89,77
sieve 200	%	6,89	kg/min	41,88
P 200	%	52,85	kg/min	321,23
<b>Ash</b>				
525°C	%	35,66	kg/min	216,75
<b>Stickies</b>				
total	mm2/kg	2243,16	mm2/min	1363426
small	mm2/kg	142,93	mm2/min	86875
medium	mm2/kg	501,30	mm2/min	304698
large	mm2/kg	1598,93	mm2/min	971853
<b>Optical characteristics</b>				
ERIC	ppm	150,70		
R457	%	63,76		
R950	%	76,56		
specific dirt spec area >100 µm	mm2/m2	1645,9775		
<b>Water retention</b>				
Schopper-Riegler-value SR		59,00		
Water-retention-value WRV		97,40		

Abbildung 34 Screenshot des Aufbaus des Feed-Vektors für Stufe 1 A

RR_V		0,15		
RR_V	%	14,50		
RR_m		0,16		
RR_m	%	16,03		
RTF		1,11		
E_R_fines		0,15	alpha_fines	1,03
E_R_short fibres		0,16	alpha_short fibres	1,02
E_R_long fibres		0,17	alpha_long fibres	0,97
E_R_slotted		0,84	alpha_slotted	0,09
E_R_30		0,22	alpha_30	0,84
E_R_50		0,18	alpha_50	0,95
E_R_100		0,17	alpha_100	0,97
E_R_200		0,13	alpha_200	1,10
E_R_P200		0,14	alpha_P200	1,08
E_R_ash		0,14	alpha_ash	1,09
E_R_total		0,28	alpha_total	0,70
E_R_small		0,13	alpha_small	1,10
E_R_medium		0,09	alpha_medium	1,29
E_R_large		0,35	alpha_large	0,57

Abbildung 35 Screenshot des Aufbaus des Berechnungs-Vektors

Bereits bei der Bestimmung des Exponenten  $\alpha$  fällt auf, dass dieser für sämtliche Faserbestandteile sehr nah bei 1 liegt (Drucksortierer 1 A - Feinstoffe: 1,02; Kurzfaser: 1,03; Langfaser: 0,97). Für  $\alpha=1$  tritt im Drucksortierer für die Faserbestandteile keinerlei Trenneffekt auf. Die Fraktionen werden weder im Accept, noch im Rejekt angereichert. Dieses Verhalten zeigt sich für die Faserbestandteile bei allen Drucksortierern in Anlage B.

Lediglich bei dem Sortierer der Stufe 2:1 ist eine Trennwirkung bei den langen Fasern zu beobachten. Dies wird in **Abbildung 36** hervorgehoben. Die langen Fasern finden sich im Rejekt, während eine Anreicherung der kurzen Fasern und Feinstoffe im Accept beobachtet werden kann.

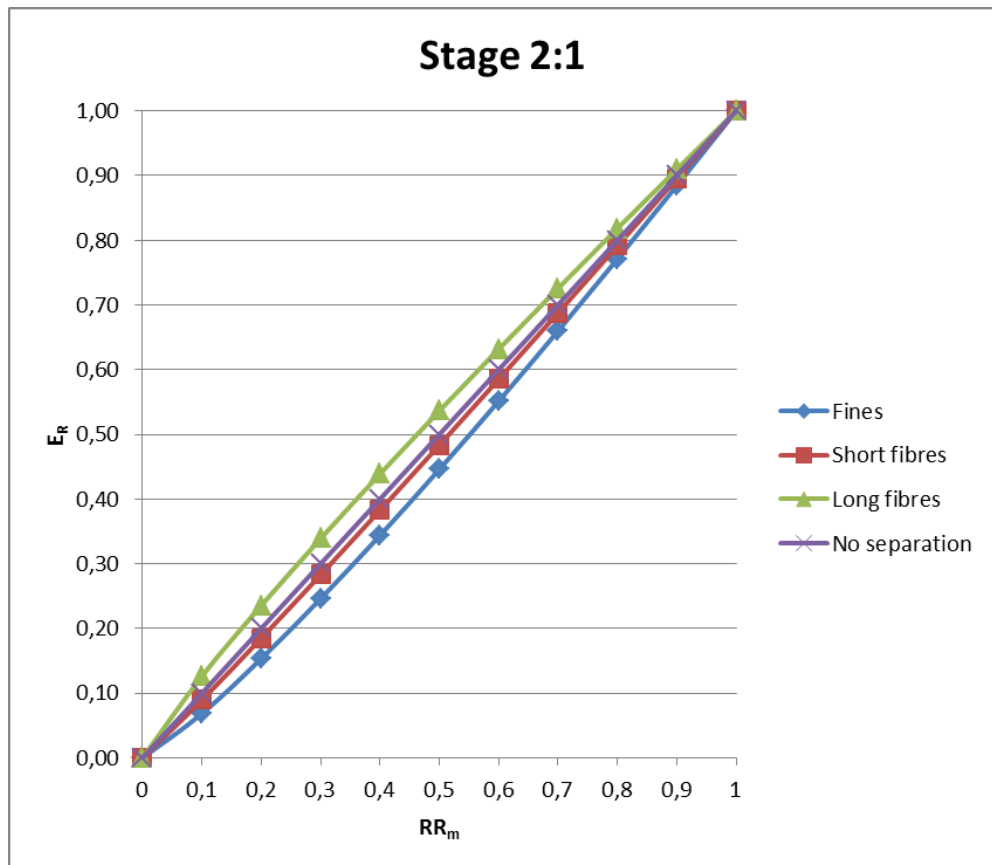


Abbildung 36 Feinstoff-, Kurzfaser- und Langfasertrennung in Drucksortierer Stufe 2:1

Für den Drucksortierer der Stufe 2:2 zeigt sich ein ähnliches Verhalten, das jedoch nicht ganz so stark ausgeprägt ist wie bei Stufe 2:1. In Sortierer 3 stellt sich ein ähnliches Verhalten wie für die Drucksortierer der ersten Stufe ein. Sowohl die Langfasern als auch die Kurzfasern und Feinstoffe teilen sich zu gleichen Anteilen auf Accept in Rejekt auf. Ein vergleichbares Bild ergibt sich auch aus der Kalkulation der alpha-Werte für die einzelnen Fraktionen der McNett-Fraktionierung. Die Sortierkoeffizienten der Fraktionen R 100 und R 200 liegen nah am Wert 1.

Anhand von **Abbildung 37** wird dieses Verhalten noch einmal verdeutlicht. Während die Bestandteile, die eine Größe von mehr als 150 µm aufweisen oder der R 30 Fraktion zugeordnet werden können, gut abgeschieden werden, zeigt sich bei kleineren Faserbestandteilen ab der R 50 Fraktion keinerlei Trenneffekt oder es kommt zu einer Anreicherung dieser Komponenten im Accept. Die Sortierstufe 1 A wurde hier repräsentativ für die anderen Sortierstufen gewählt, da sich in den anderen Stufen ein vergleichbares Verhalten zeigt.

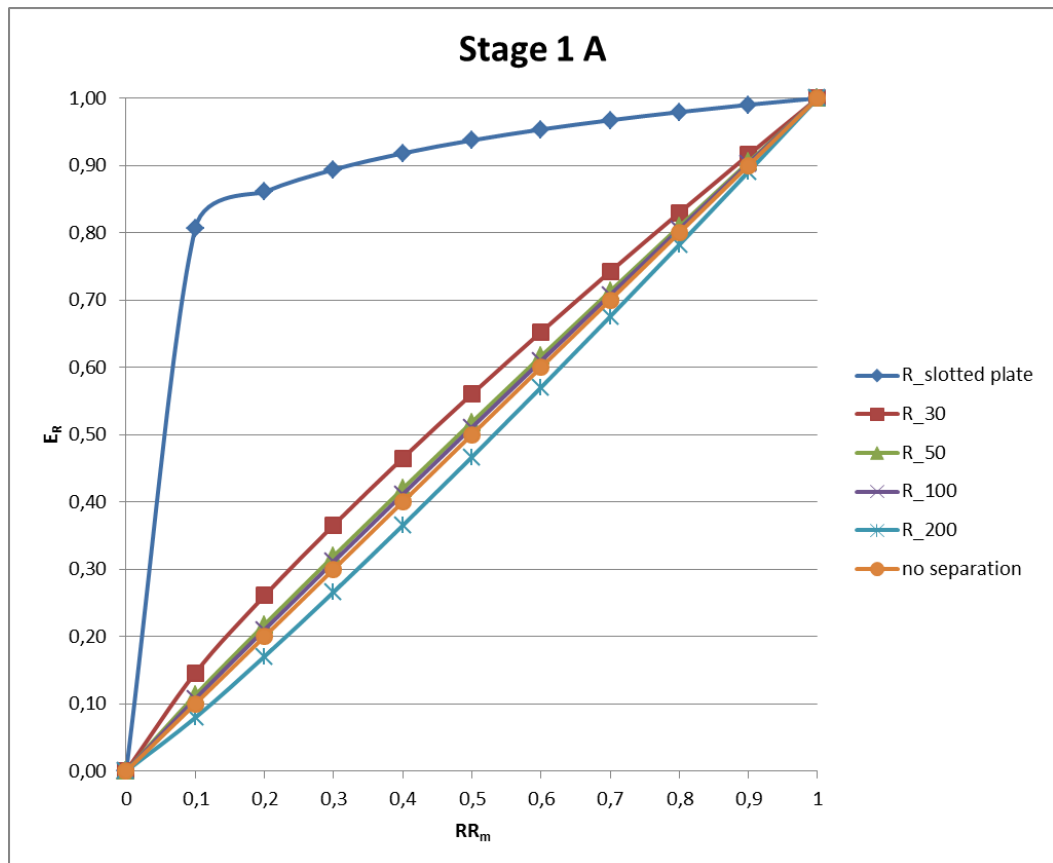


Abbildung 37 Drucksortierer Stufe 1 A

Auffällig ist, dass den Bestandteilen der R 200 Fraktion in allen Sortierstufen ein  $\alpha$ -Wert von größer als 1 zugeordnet ist und sich die Feinstoffe somit bevorzugt im Accept anreichern. Dieses Verhalten spiegelt sich sowohl in Abbildung 36 als auch in Abbildung 37 wieder.

In Anlage B lassen sich keine sinnvollen Schlüsse für das Trennverhalten der klebenden Bestandteile aus den Messwerten einer Stichprobenuntersuchung ziehen. Die Werte für  $\alpha$  sind zwischen den einzelnen Stufen nicht konsistent. Dies ist unter anderem der starken Streuung der Messwerte und der Tatsache geschuldet, dass aufgrund einer begrenzten Probenmenge je nur zwei Messungen durchgeführt werden konnten. Zudem kann aufgrund eines längeren Transportweges nicht ausgeschlossen werden, dass es unter höheren Temperaturen zu Agglomerationen der klebenden Bestandteile gekommen ist.

Im Idealfall liegt die Abscheidung der großen Stickies bei 100 %, was einem Trenngrad von 1 entsprechen würde. In allen Sortierstufen, Sortierstufe 3 ausgeschlossen, liegen die Werte weit darunter. Auffällig ist auch, dass sich für die mittelgroßen Stickies stets ein



---

höherer Trenngrad ergibt, als für die großen Stickies mit einem kreisäquivalenten Durchmesser von mehr als 1000  $\mu\text{m}$ . An dieser Stelle stellt sich die Frage, ob die Ursache für diese Ergebnisse in den allgemeinen Prozessschwankungen zu suchen ist oder auf Fehler bei den Labormessungen zurückzuführen ist. Da das Verhalten jedoch bei sämtlichen Drucksortierern auftritt, ist zu vermuten, dass es sich nicht um Prozessschwankungen handelt, sondern auf Veränderungen der Stickies im Laufe des Transport- und Lagerungsprozesses.

Da angenommen werden kann, dass sich für die größten Stickies auch die beste Abscheidung ergibt, werden für die Modellierung der Stickyabscheidung weitere Annahmen getroffen. Die Bestimmung des „wahren“ Trenngrades für die Stickyabtrennung kann jedoch nur durch weitere Probenentnahmen erfolgen. Für die Modelle wird für die großen Stickies  $\alpha=0,1$  angenommen. Eine 100 prozentige Überführung der Stickies ins Rejekt kann statistisch nicht gewährleistet werden, sodass ein geringerer Wert als 1 für den Trenngrad angenommen wird. Die mittelgroßen Stickies, deren kreisäquivalenter Durchmesser zwischen 500 und 1000  $\mu\text{m}$  liegt, werden mit  $\alpha=0,2$  modelliert. Den kleinen Stickies, welche theoretisch aufgrund ihrer Verformbarkeit und ihren kleinen Dimensionen ins Accept übergehen können, wird mit  $\alpha=0,3$  der höchste Wert zugeordnet. Ein Trenngrad, der dem der R 50-Fraktion der Haindl-McNett Fraktionierung entspricht, erscheint dabei akzeptabel, um die Zustände ausreichend abzubilden.

Da es sich bei den Sortierern 1 A und 1 B um Aggregate gleicher Bauart handelt und angenommen wird, dass aufgrund der 50:50 Auftrennung der Stoffströme im Zulauf beide Sortieraggregate mit einer Suspension der gleichen Zusammensetzung durchströmt werden, wurde der Drucksortierer 1 B nicht zusätzlich beprobt. Aus diesem Grund werden die für Drucksortierer 1 A gemessenen Werte für Stoffdichte, Faserzusammensetzung und Aschegehalt auch unverändert für Drucksortierer 1 B übernommen. Lediglich die Werte der Volumendurchflüsse, die im Zulauf der ersten Stufe über Online-Messverfahren erfasst werden, werden angepasst.

Für den Drucksortierer 2:1 ergibt sich ein zu den Drucksortierern der ersten Stufe vergleichbares Bild. Bei der Bestimmung der Stickies treten erneut Unstimmigkeiten auf. Aus diesem Grund werden auch für die Stufe 2:1 die zuvor erläuterten Werte für  $\alpha$  bei der Modellierung eingesetzt.

Bei der Auswertung der Messergebnisse von Sortierstufe 2:2 fällt auf, dass sowohl die volumen- als auch die massenbezogene Rejektrate wesentlich geringer ausfallen. Die Abscheidung fällt für alle Faserkomponenten gering aus. Die Ergebnisse der Haindl-McNett Fraktionierung korrelieren jedoch weitgehend mit der Fiberclass-Auswertung. Da die Schopper-Riegler-Werte und das Wasser-Rückhaltevermögen gut mit dem Aschegehalt der Probe korrelieren, wurde versucht, den Zusammenhang zwischen Feed, Accept und Rejekt durch eine Regressionsanalyse herzustellen. Es zeigt sich jedoch, dass eine einfache Bestimmung der Schopper-Riegler-Werte und des Wasserrückhaltevermögens nicht ausreichen, um die Zusammenhänge ausreichend abzubilden. Selbiges gilt auch für die optischen Eigenschaften der Suspensionsströme.

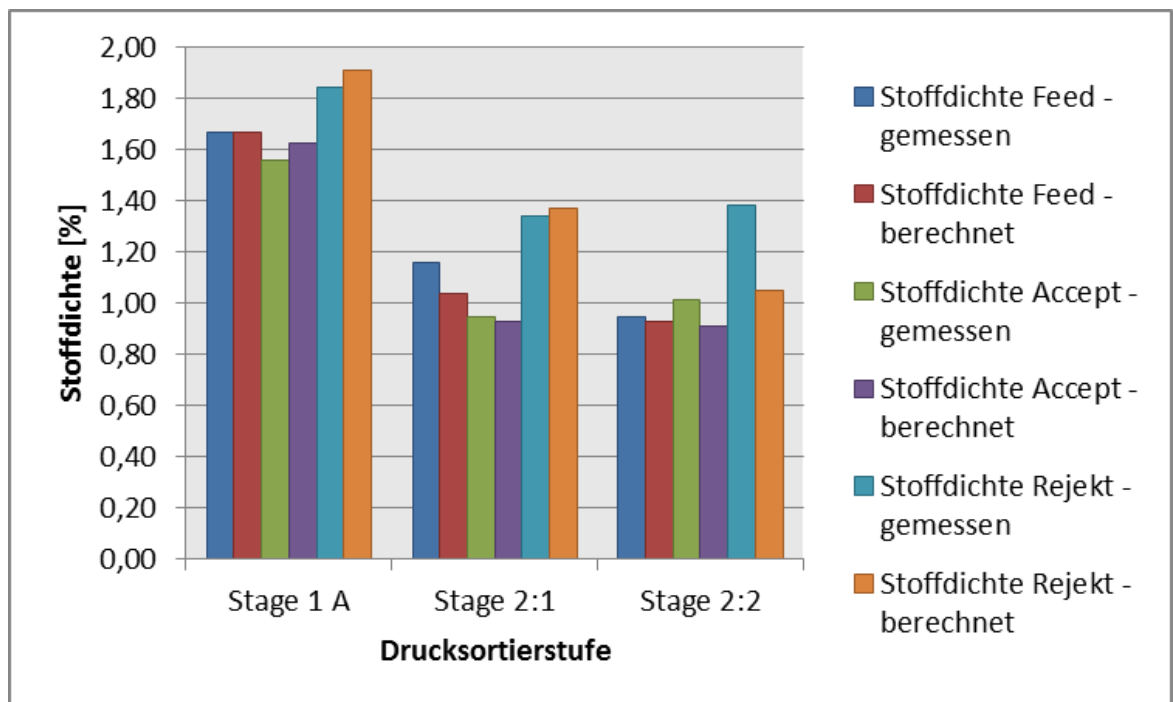


Abbildung 38 Gegenüberstellung der Stoffdichte Anlage B

Aus **Abbildung 38** geht der Zusammenhang zwischen der in einer Stichprobenuntersuchung ermittelten Stoffdichte und der sich rechnerisch aus dem Modell ergebenden Stoffdichte bei gleichen massenbezogen Rejektraten hervor. Auffällig ist insbesondere die vergleichsweise starke Abweichung im Rejekt für Sortierstufe 2:2 zwischen der gemessenen und berechneten Stoffdichte. Für Drucksortierer 1 A wurde eine massenbezogene Rejektrate von  $RR_m = 16\%$  eingestellt, für Sortierer 2:1 liegt die

---

Rejektrate bei  $RR_m=32\%$  und für den Drucksortierer 2:2 bei  $RR_m=14\%$ . Die dritte Stufe der Drucksortierung wird an dieser Stelle nicht in die Betrachtungen mit einbezogen, da diese mit dem Accept der ersten Cleaner-Stufe beschickt wird und die Cleaner-Anlage zunächst nicht Teil der Untersuchungen war. Im weiteren Projektverlauf sollte diese jedoch unbedingt berücksichtigt werden, da die Cleaner-Anlage sämtliche schweren Bestandteile wie Glas- oder Kunststoffstücke von der Stoffsuspension abtrennt. Sämtliche Rejektproben von Anlage B waren stark mit großen Kunststoff- und Glasstücken belastet. **Abbildung 39** zeigt die Rückstände auf der Schlitzplatte nach der Haindl-Fraktionierung des Rejektes von Stufe 1 A.

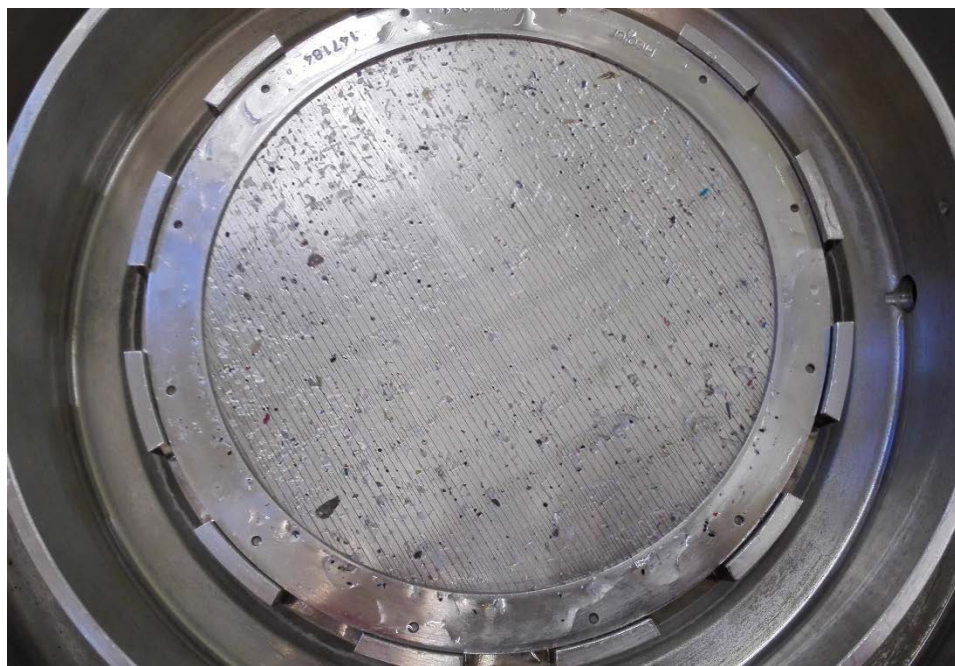


Abbildung 39 Rückstände der Haindl-Fraktionierung nach INGEDE Methode 4

In **Abbildung 40** sind für die ersten drei Drucksortieraggregate in Anlage B die gemessenen und anhand des Modells berechneten Aschegehalte bei gleicher massenbezogener Rejektrate gegenübergestellt. Es zeigen sich recht starke Unterschiede zwischen den Aschegehalten der Stichprobe und dem kalkulierten Aschegehalt. Dies ist darauf zurückzuführen, dass in den Modellen für die Asche angenommen wurde, dass sie sich nach der volumetrischen Rejektrate auf Accept und Rejekt aufteilt. Aus der Stichprobenuntersuchung ergab sich für alle Stufen ein Alpha größer als 1, was auf eine Anreicherung der mineralischen Füllstoffe im Accept hinweist.

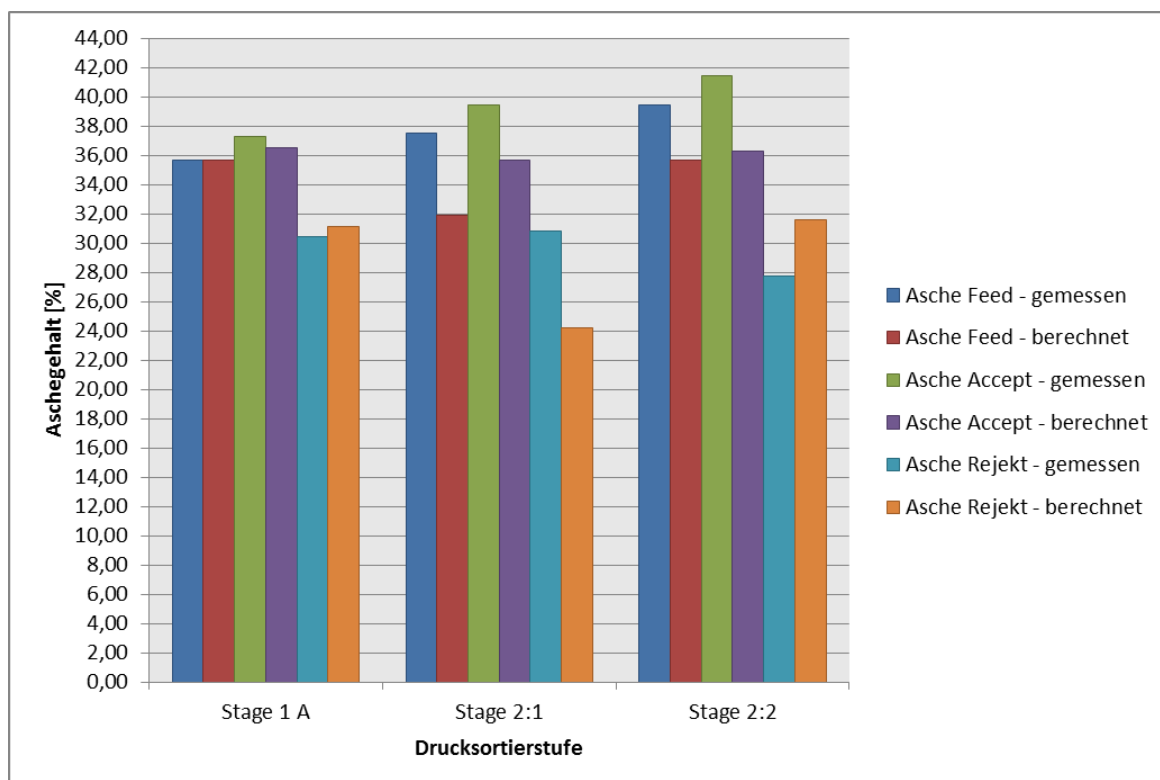


Abbildung 40 Gegenüberstellung des Aschegehaltes Anlage B

Tabelle 11 Messabweichungen von Glührückstand und Stoffdichte

Abweichungen Asche			
	Feed	Accept	Rejekt
Stage 1 A	0	-1,93	2,31
Stage 2:1	-14,93	-9,67	-21,65
Stage 2:2	-9,67	-12,40	13,65

Abweichungen Stoffdichte			
	Feed	Accept	Rejekt
Stage 1 A	0	4,22	3,61
Stage 2:1	-10,74	-1,82	1,98
Stage 2:2	-1,82	-10,12	-24,32

**Tabelle 11** stellt die Abweichungen zwischen Modell und der Stichprobenuntersuchung gegenüber. Es zeigt sich, dass die Abweichungen in der ersten Stufe am geringsten ausfallen. Für die weiteren Stufen ist die Abweichung zwischen den gemessenen Werten und den berechneten Werten deutlich höher und reicht bis zu etwa 25 %.

---

Dies ist auch der Tatsache geschuldet, dass der Probenumfang im Vergleich zu den Durchflüssen äußerst gering ausfällt und damit die Messfehler zum Großteil der Momentaufnahme zugeschrieben werden können.

Für die Komponenten der Haindl-McNett-Fraktionierung und die Stickyentfrachtung ergeben sich ähnliche Abweichungen zwischen dem Modell und den Messungen. Daher soll an dieser Stelle von einer detaillierten Betrachtung abgesehen werden und auf die Modelle auf beiliegendem Datenträger verwiesen werden.

---

## **9.4 Modellierung der Flotation**

---

Da für den Deinking-Prozess in der Flotation im Wesentlichen optische Eigenschaften des Faserstoffes im Vordergrund stehen, liegt bei der Modellierung der Flotationsprozesse der Fokus auf den optischen Eigenschaften, wie ERIC-Wert, Schmutzpunktgehalt und Weißgrad. Zudem wird mit dem Flotationsschaum auch ein Teil der Feinstoffe und Fasern ausgetragen. Daher wird bei der Modellierung der Flotationsprozesse auch die Ausbeute der Fasern und Füllstoffen berücksichtigt.

---

### **9.4.1 Anlage A**

---

In Anlage A sind alle Flotationszellen vom gleichen Typ und werden in etwa bei demselben Füllstandsniveau betrieben. Lediglich Stufe 1 weicht mit einem geringeren Füllstand davon ab. Dies liegt daran, dass es in der ersten Stufe zu einer stärkeren Schaumentwicklung kommt. Sowohl für die Vor- als auch für die Nachflotation sind die Stoffdichten der Zuläufe und der Accepte bekannt. Die Beprobung der einzelnen Rejekte war aus betriebstechnischen Gründen nicht möglich. Es konnte lediglich das Gesamt-Rejekt aus Vor- und Nachflotation, welches in einem Tank zusammengeführt wird, untersucht werden. Sowohl für die erste Zelle der Vorflotation als auch für die erste Zelle der Nachflotation sind die einströmenden Volumenströme bekannt und werden kontinuierlich aufgezeichnet.

Die Theorie besagt, dass bei einem Flotationsvorgang bevorzugt kleine und leichte Partikel mit einer Partikelgröße zwischen 10  $\mu\text{m}$  und 100  $\mu\text{m}$  aus der Suspension ausgetragen werden [19]. Damit werden insbesondere die mineralischen Partikel und die hydrophoben

---

Druckfarbenpartikel ausgetragen. Somit trifft dies auf die P 200-Fraktion der Haindl-McNett Fraktionierung und die Glührückstände zu. Die größeren Faserbestandteile und Partikel, welche beispielsweise der Haindl-McNett P 30-Fraktion und der P 50-Fraktion zugeordnet werden können, werden hingegen kaum ausgetragen und mit dem Accept der ersten Flotationszelle in die nachfolgende Flotationszelle weitergetragen.

In einem ersten Schritt wurde für die Berechnung der unbekannten Accept und Rejekt-Massenströme auf die Glührückstands- und Feinstoffbestimmung zurückgegriffen, da diese kleinen Bestandteile bevorzugt mit dem Flotationsschaum ausgetragen werden. Die Literatur gibt für die Menge an Flotationsschaum 9-10 % der Zufuhr an otro Stoff zu den Flotationszellen an [54].

Zunächst wird die Feinstoff- und die Aschekonzentration im Feed und im Accept der einzelnen Flotationszellen rechnerisch bestimmt. Diese Angabe erfolgt in Gramm pro Liter. Daraus lässt sich der prozentuale Asche- und Feinstoffaustrag für die einzelnen Zellen in Vor- und Nachflotation bestimmen. Dieser prozentuale Ascheaustrag ist nicht gleichzusetzen mit dem Ascheaustrag in kg/min, da sich der Massenstrom in Abhängigkeit der Stoffdichte und des Volumenstromes verändert. Für Anlage A ist lediglich der Volumenstrom im Zulauf zur ersten Zelle der Primärstufe der Vorflotation sowie der Volumenstrom im Zulauf zur ersten Zelle der Primärstufe der Nachflotation bekannt. Die Accept-Volumenströme, die von einer Zelle zur nächsten gefördert werden, sind jedoch unbekannt. Daher wurde in einem ersten Schritt angenommen, dass der prozentuale Ascheaustrag auch auf die Reduzierung des Massenstromes zwischen den einzelnen Flotationszellen anwendbar ist.

Zwischen den ermittelten Stoffdichten im Zu- und Auslauf der vierten Stufe der Primärstufe der Vorflotation ist es augenscheinlich zu einem Fehler gekommen, der entweder auf eine Prozessschwankung oder eine fehlerhafte Untersuchung zurückzuführen ist. Daher werden zwei Verfahren angewendet, um diese Ungenauigkeit zu bereinigen. Der Feinstoff- bzw. der Ascheaustrag folgen einem linearen Verlauf. Aus diesem Grund wird zunächst lediglich der prozentuale Feinstoff- bzw. Aschenanteil im Accept der vierten Stufe neu berechnet. In einer weiteren Annäherung werden zudem die Stoffdichten korrigiert. Ein Korrekturverfahren beruht auf der Berechnung einer Trendlinie durch das Programm Microsoft Excel.

Das zweite Verfahren sieht die Annäherung einer fehlerbehafteten Stoffdichte durch die Mittelwertbildung der beiden vor- und nachgestellten Stoffdichten vor.

In **Abbildung 41** und **Abbildung 42** werden die berechneten Massenströme gegenübergestellt und der Mittelwert der einzelnen Messwerte gebildet. Der Gesamtverlust in der Primärstufe der Vorflotation beträgt demnach 12,75 %. In der Primärstufe der Nachflotation kommt es zu Verlusten von 7,69 %.

	Gesamtmassenstrom aus Messwerten [kg/min]	Gesamtmassenstrom korrigiert [kg/min]	Gesamtmassenstrom linearisiert [kg/min]		Mittelwert Gesamtmassen- strom [kg/min]
<b>RR<sub>m</sub> Cell 1</b>	6,34	2,28	2,84		3,82
<b>Feed Cell 1 Pre-Flotation</b>	269,43	269,43	269,43		269,43
<b>Accept Cell 1 Pre-Flotation</b>	252,36	263,27	261,79		259,14
<b>Reject Cell 1 Pre-Flotation</b>	17,07	6,16	7,64		10,29
<b>RR<sub>m</sub> Cell 2</b>	0,33	3,28	3,92		2,54
<b>Feed Cell 2 Pre-Flotation</b>	252,36	263,27	261,79		259,14
<b>Accept Cell 2 Pre-Flotation</b>	251,52	254,64	251,52		252,56
<b>Reject Cell 2 Pre-Flotation</b>	0,84	8,64	10,27		6,58
<b>RR<sub>m</sub> Cell 3</b>	3,68	3,76	3,63		3,69
<b>Feed Cell 3 Pre-Flotation</b>	251,52	254,64	251,52		252,56
<b>Accept Cell 3 Pre-Flotation</b>	242,26	245,05	242,39		243,23
<b>Reject Cell 3 Pre-Flotation</b>	9,26	9,59	9,13		9,32
<b>RR<sub>m</sub> Cell 4</b>	4,58	2,64	2,85		3,35
<b>Feed Cell 4 Pre-Flotation</b>	242,26	245,05	242,39		243,23
<b>Accept Cell 4 Pre-Flotation</b>	231,17	238,59	235,47		235,08
<b>Reject Cell 4 Pre-Flotation</b>	11,09	6,46	6,91		8,16
<b>RR<sub>m</sub> Sec Cell</b>	5,09				5,09
<b>Feed Secondary Cell Pre-Flotation</b>	32,88				32,88
<b>Accept Secondary Cell Pre-Flotation</b>	31,21				31,21
<b>Reject Secondary Cell Pre-Flotation</b>	1,67				1,67

Abbildung 41 Vorflotation - Gegenüberstellung der korrigierten Massenströme



	Gesamtmassenstrom aus Messwerten [kg/min]	Gesamtmassenstrom korrigiert [kg/min]	Gesamtmassenstrom linearisiert [kg/min]		Mittelwert Gesamtmassenstrom [kg/min]
<b>RR<sub>m</sub> Cell 1</b>	5,47	2,02	2,04		3,18
<b>Feed Cell 1 Post-Flotation</b>	200,72	200,72	200,72		200,72
<b>Accept Cell 1 Post-Flotation</b>	189,73	196,67	196,62		194,34
<b>Reject Cell 1 Post-Flotation</b>	10,99	4,05	4,10		6,38
<b>RR<sub>m</sub> Cell 2</b>	-0,39	3,12	3,12		1,98
<b>Feed Cell 2 Post-Flotation</b>	189,73	196,67	196,62		194,34
<b>Accept Cell 2 Post-Flotation</b>	190,47	190,53	190,47		190,49
<b>Reject Cell 2 Post-Flotation</b>	-0,74	6,13	6,14		3,85
<b>RR<sub>m</sub> Cell 3</b>	3,04	2,10	3,04		2,73
<b>Feed Cell 3 Post-Flotation</b>	190,47	190,53	190,47		190,49
<b>Accept Cell 3 Post-Flotation</b>	184,68	186,53	184,68		185,29
<b>Reject Cell 3 Post-Flotation</b>	5,80	4,01	5,80		5,20
<b>RR<sub>m</sub> Sec Cell</b>	13,65				13,65
<b>Feed Secondary Cell Post-Flotation</b>	15,43				15,43
<b>Accept Secondary Cell Post-Flotation</b>	13,32				13,32
<b>Reject Secondary Cell Post-Flotation</b>	2,11				2,11

Abbildung 42 Nachflotation - Gegenüberstellung der korrigierten Massenströme

In der Primärstufe der Vorflotation werden rund 33 kg/min Asche ausgetragen. Dies entspricht einem Anteil von 34,15 %. In der Primärstufe der Nachflotation liegt der Ascheaustrag bei 18,54 kg/min, was einem Anteil von 37,67 % entspricht.

Eine erste Kontrolle dieser Messwerte anhand der Kalkulation der Volumen- und Massenströme unter Einsatz der korrigierten Stoffdichten zeigt gute Ergebnisse.

Um den Stoffstrom zu bestimmen, welcher in die Sekundärstufe der Vor- und Nachflotation einströmt, ist erneut eine Vereinfachung nötig. So wird in einem ersten Schritt das vor die Sekundärstufe zurückgeführte Accept ebendieser vernachlässigt und davon ausgegangen, dass die Sekundärstufe nur von den Rejekten der Primärstufe durchlaufen wird. In Wirklichkeit wird ein Teil des Acceptes der Sekundärstufe zu unbekannten Teilen aufgeteilt. Ein Teil wird vor die erste Zelle der Primärstufe zurückgeführt, der zweite Teil wird vor die Sekundärzelle zurückgeführt. Diese unbekannten Stoffströme sind im weiteren Projektverlauf zu bestimmen.

Für die Sekundärzellen ergibt sich im Vergleich zur Primärstufe eine erhöhte Rejektrate. Diese scheint durchaus plausibel, da in den Rejekten nur wenige Fasern vorhanden sind.

Bei der Eingabe der zuvor ermittelten Massenströme in das Excel-Tabellenblatt zur Berechnung der Trenngrade ergeben sich für mehrere Suspensionskomponenten negative Werte für die Rejektkomponenten.



---

Dies betrifft insbesondere die mittels Fiberlab-Messgerät ermittelte Feinstoff-Klasse und die Haindl-McNett-Rückstände der Schlitzplatte, der R 30- Fraktion und der R 50- Fraktion. Die Ursache für die negativen Messwerte der Feinstoff-Klasse hängt vermutlich mit der fehlerbehafteten Detektierung von Feinstoffen durch das Kajaani Fiberlab zusammen. Es kann davon ausgegangen werden, dass diese nicht vollständig erfasst werden. Die negativen Werte der Haindl-McNett-Fraktionierung ergeben sich mutmaßlich aufgrund von Prozessschwankungen. Es wurden jeweils 25 Liter Probenmaterial entnommen. Bei einem Volumenstrom von etwa 25000 Litern pro Minute stellt dies eine nicht zu vernachlässigende Fehlerquelle dar. Auch die Anordnung der Probenentnahmehähne und die Art und Weise, wie die Proben entnommen wurden, können einen entscheidenden Einfluss auf die Zusammensetzung des Stoffes in den Probenbehältnissen haben.

In **Abbildung 43** ist ein Screenshot des Trenngrad-Kalkulationsdatenblattes für die Vorflotation in Microsoft Excel dargestellt. Der Aufbau des Tabellenblattes ist identisch mit denen der Feinsortierung, bis auf die Berechnung der Ausbeuten im rechten Bereich des Tabellenblattes. Da für die Rejekte keine Messung der optischen Eigenschaften möglich war, ist es schwierig diese in der nachfolgenden Modellierung mit Werten zu besetzen. Selbiges gilt für die Stickyabtrennung. Da die Messwerte zwischen den einzelnen Stufen erneut aufgrund der Transport- und Lagerzeiten nicht konsistent waren, wurde an dieser Stelle auf eine Eintragung in die Tabellen verzichtet.



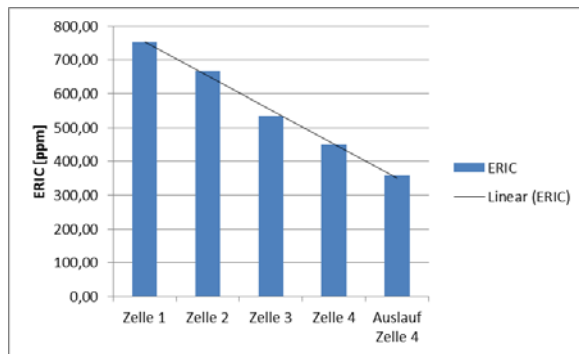


Abbildung 44 Anlage A - ERIC-Wert

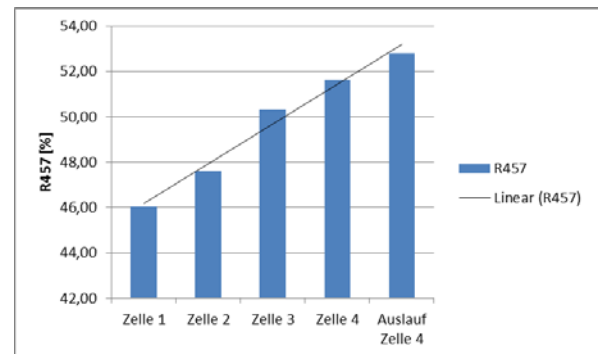


Abbildung 45 Anlage A - Weißgrad R457

Eine Korrelationsanalyse des Aschestromes mit dem ERIC- und dem R457- Wert ergibt für beide Messwerte eine sehr gute Korrelation ( $r_{\text{ERIC};\text{ash}} = 0,9932$  sowie  $r_{\text{R457};\text{ash}} = -0,98$ ). Aus diesem Grund kann für die Modellierung der optischen Werte bei der Flotation, wie auch bei der Feinsortierung, auf die Veränderung des Aschegehaltes zurückgegriffen werden.

## 9.5 Modellierung der Dispergierung

In diesem Abschnitt wird die Dispergierung betrachtet. Die Dispergierung unterscheidet sich dahingehend von den zuvor betrachteten Prozessen, als dass es sich nicht um einen Trennprozess handelt. Stattdessen durchströmt der Suspensionsstrom den Disperger und wird bezüglich seiner Eigenschaften verändert. Es werden bereits am Disperger Chemikalien für den anschließenden Bleichprozess zugesetzt, die die optischen Eigenschaften des Suspensionsstroms zusätzlich beeinflussen. Ebenso ändern sich durch den Dispergierprozess diverse Fasereigenschaften, wie die Faserlänge und der Fasercurl in Abhängigkeit der eingetragenen spezifischen Dispergierenergie. Die Modellierung erfolgt unter Zuhilfenahme der in Kapitel 5.3.3 eingeführten Formeln.

### 9.5.1 Anlage A

Der in Anlage A verbaute Disperger konnte im Rahmen dieser Arbeit lediglich einmal beprobt werden. Zum Zeitpunkt der Probenentnahme wurde eine spezifische Leistungsaufnahme von 55 kWh/t verzeichnet (reine Mahlleistung= 561 kW; Durchsatz=10,2 t/h). Es wurden Natronlauge, Wasserstoffperoxid und Wasserglas in

---

unbestimmten Verhältnissen zudosiert. Die Scheiben des Dispergers waren in einem Abstand von 1,52 mm zueinander angeordnet.

Die Faserstoffe des Disperger-Einganges und des Disperger-Ausganges wurden mit dem Kajaani Fiberlab vermessen. Es zeigte sich, dass die Behandlung im Disperger für die untersuchte Stichprobe keinen Einfluss auf die Faserbreite, die Faserwanddicke sowie die Fibrillierung hat. Auch bei der längen- und massengewichteten Faserlänge zeigen sich überraschenderweise keinerlei Veränderungen. Lediglich bei der Faserkrümmung zeigen sich Veränderungen der fasermorphologischen Eigenschaften.

Die Auswertung mit dem Fiberclass-Tool zeigt jedoch eine Zunahme des prozentualen Feinstoffgehaltes, während der Kurzfaser- und der Langfasergehalt zurückgehen. Dies ist auch mit den in Kapitel 5.3.3 vorgestellten Formeln konform. Auch die Haindl-McNett-Fraktionierung deutet auf einen Anstieg des Feinstoffgehaltes hin.

Die Berechnung der Konstanten  $b_{res}$  und  $c_{res}$  zeigt, dass es sich um einen relativ mahlbeständigen Altpapierstoff handelt. Der für  $b_{res}$  ermittelte Wert liegt bei 0,965, während der für  $c_{res}$  bestimmte Faktor einen Wert von 0,947 annimmt. Wie zuvor bereits erwähnt, kommt es im Zusammenhang mit dem Dispergiervorgang auch zu einer Veränderung des Fasercurls. Da davon auszugehen ist, dass der Fasercurl ebenfalls von der eingetragenen spezifischen Mahlleistung abhängt, wurden die für die Faserlängenverteilung verwendeten Formeln für den Curl angepasst. Ob untenstehende Formel in dieser Form verlässliche Ergebnisse liefert, ist in weiteren Untersuchungen zu ermitteln. In einem ersten Schritt soll sie an dieser Stelle nur als Vergleich zwischen den beiden untersuchten Anlagen dienen und eine grobe Bewertung der beiden Disperger ermöglichen. Eventuell ist eine weitere Anpassung durch Konstanten oder Faserqualitätsparameter nötig. Im Gegensatz zu den Faserlängenverteilungen, bei denen es stets zu einer Verschiebung der Langfaserfraktion hin zur Kurzfaser- und Feinstofffraktion kommt, kommt es bei der Betrachtung des Fasercurls zu einer Erhöhung des Messwertes. Es wurde folgende Formel zur Berechnung der neu eingeführten Konstante  $d_{res}$  verwendet.

$$Curl = Curl(0) * d_{res}^{SRE/100} \quad (42)$$

Für die Konstante  $d_{res}$  ergab sich für die Stichprobenauswertung in Anlage ein Wert von 1,476.

---

## 10 Zusammenfassung und Ausblick

---

Mit dieser Arbeit wurde der Grundstein für die Modellerstellung der Stoffaufbereitungsanlagen zweier Papierfabriken für grafische Papiere gelegt. Im weiteren Verlauf des REFFIBRE Projektes werden diese Stoffaufbereitungsmodelle um Nachhaltigkeitsindikatoren erweitert, welche einen nachhaltigeren Papieraufbereitungs- und Papierherstellungsprozess ermöglichen sollen. Da für die Papierproduktion bisher keine Definition für Nachhaltigkeit existiert und sich die Umsetzung des Nachhaltigkeitsgedankens in Papierfabriken bislang überwiegend auf die Reduzierung des Energie- und Wasserverbrauches beschränkt, wurde der Begriff der Nachhaltigkeit und die einem nachhaltigen Betrieb zu Grunde liegenden Prinzipien umfassend erläutert. Die Definition von Nachhaltigkeit sieht die Berücksichtigung dreier Komponenten vor. Während die ökologische Ausprägung der Nachhaltigkeit bereits eng mit der ökonomischen Komponente verknüpft ist, wird die soziale Komponente häufig vernachlässigt. Im Zuge dieses Projektes wird sie ebenfalls nicht berücksichtigt. Dies ist jedoch auch der Tatsache geschuldet, dass die soziale Ausprägung der Nachhaltigkeit nur schwer objektiv und in Zahlenwerten erfassbar ist.

Um die Stoffaufbereitungsprozesse hinsichtlich ihrer ökologischen und ökonomischen Nachhaltigkeit analysieren zu können, ist eine umfassende Betrachtung der Stoffaufbereitungsprozesse notwendig. Im Zuge der Technikfolgenabschätzung werden die Stoffaufbereitungsprozesse eingehend betrachtet. In Kapitel 4.4 wurden mit der Stoffstromanalyse und der Ökobilanzierung zwei Verfahren vorgestellt, anhand derer eine qualitative und quantitative Bewertung von Produktionsprozessen möglich ist. Da nicht der vollständige Papierherstellungsprozess und auch nicht das Papierprodukt an sich analysiert werden, sondern lediglich die Stoffaufbereitung untersucht wird, leistet das Stoffstrommanagement gute Dienste. Es werden sämtliche Materialströme, welche in die Systeme einströmen und diese verlassen, sowohl qualitativ als auch quantitativ abgebildet. So lässt sich der Aufbau der einzelnen Abschnitte der Stoffaufbereitung anhand der Einführung einer räumlichen Systemgrenze erklären und darstellen. Für die Beschreibung der Systeme werden Modelle, Parameter und Indikatoren herangezogen. Die Modelle bilden dabei die in Wirklichkeit ablaufenden Prozesse mithilfe mehrerer ausgewählter Parameter ab. Die Parameter werden durch sogenannte Indikatoren ergänzt, die durch mathematische Verknüpfungen einen bestimmten Sachverhalt verdeutlichen.

---

Das Entwässerungsverhalten ist beispielsweise eng mit dem Gehalt an mineralischen Füllstoffen und Pigmenten verknüpft. Ebenso werden die Volumenströme über das Trennverhalten der Füllstoffe berechnet.

Bei der Erzeugung der Modelle ist es jedoch oftmals notwendig starke Vereinfachungen vorzunehmen, um zu den angestrebten einfachen aggregierten Nachhaltigkeitsindikatoren zu kommen. Darunter leiden die in den meisten Fällen die Vollständigkeit. Zudem steigt die Fehleranfälligkeit der Berechnungen.

In Kapitel 7 wurde der Aufbau der beiden Anlagen dargelegt. Für Anlage B wurde aufgrund des umfangreichen Versuchsumfanges lediglich die Feinsortierung untersucht. Im weiteren Projekterlauf werden zusätzlich auch Proben der Flotation und der Dispergierung von Anlage B untersucht. Erste Probenentnahmen der Feinsortierungsprozesse in den Anlagen A und B, bei denen je lediglich Feed und Accept, beprobt und untersucht wurden, erwiesen sich zur Beschreibung der aktuellen Prozesssituation als unzureichend. Eine weitere Probenentnahme sowohl für Anlage A als auch für Anlage B, bei der Feed, Accept und Rejekt der Feinsortierung beprobt wurden, ermöglichte die Bestimmung der Rejekttraten und weiterer Parameter. Anhand der ermittelten Parameter konnten erste Modelle der Feinsortierungsprozesse der beiden Anlagen entwickelt werden. Diese Modelle weisen jedoch noch einige Defizite auf, die lediglich durch weitere Untersuchungen der Prozesse bereinigt werden können. Der Stoffaufbereitungsprozess in Anlage A unterliegt offensichtlich deutlich stärkeren Schwankungen im Vergleich zu der Stoffaufbereitung in Anlage B. Die genaue Ursache für die höheren gemessenen Stoffdichten im Accept im Vergleich zum Feed in Sortierstufe 1 und 3 konnte nicht zweifelsfrei ermittelt werden. Ein Zusammenhang mit den Spülvorgängen der Sortierer konnte durch eine zweite Beprobung ausgeschlossen werden. Daher liegt es nahe, die Ursache in der Regelung der Anlage zu suchen. In Anlage A gilt es bei weiteren Probenentnahmen sowohl stochastische als auch systematische Fehler bei der Probenentnahme zu ermitteln und für sämtliche weitere Probenentnahmen auszuschließen. Nur durch eine Probenentnahme über einen längeren Zeitraum, eventuell in Form einer Mischprobe über einen oder mehrere Tage verteilt oder durch die regelmäßige Analyse der Stoffaufbereitung zu unterschiedlichen Zeitpunkten über mehrere Tage hinweg, lassen sich Fehler bei der Probenentnahme und Schwankungen im Prozess erkennen und verstehen.

---

Damit lässt sich zum einen korrigierend in die Prozesse eingreifen, zum anderen ermöglicht diese Art der Probenentnahme auch die Korrektur von Abweichungen in den Modellen.

Um eine präzise Aussage über die Wirksamkeit der einzelnen Sortierer und Flotationszellen treffen zu können, ist eine Messung der Durchflüsse dringend notwendig. Durch die unterschiedliche Zusammensetzung des in den Pulper eingetragenen Altpapieres und die zwischen den Prozessen auftretenden Schwankungen ist es erstrebenswert, mittels einer Durchflussmessung eine mögliche Fehlerursache in den Modellen zu identifizieren und an gegebener Stelle durch Anpassungen auszugleichen.

Im Zuge der ersten Berechnungen wurde zudem bereits deutlich, dass auf eine Betrachtung der Fehlerfortpflanzung nicht verzichtet werden kann, da es zu signifikanten statistischen Abweichungen kommt, wie bereits in Kapitel 9 dargelegt wurde.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass eine realitätsnahe Abbildung der Stoffaufbereitungsprozesse nur durch das Treffen verschiedener Annahmen möglich ist. Die Sammlung der zur Berechnung und Modellierung notwendigen Daten fällt gleichwohl wesentlich umfangreicher aus als zuvor erwartet. Zudem fallen die Prozessschwankungen stark ins Gewicht, wodurch weitere Untersuchungen der Anlagen nötig werden.

---



---

## Tabellenverzeichnis

---

Tabelle 1 Zusammenfassung der Auswirkungen von Design-, Betriebs- und Faserqualitätsparametern auf Kapazität und Selektivität von Drucksortierern [46]	26
Tabelle 2 Struktur der Modelldefinition .....	49
Tabelle 3 Struktur der Parameterdefinition.....	50
Tabelle 4 Struktur der Indikatorendefinition.....	50
Tabelle 5 Stufen der Stoff- und Energieflussanalyse [66] .....	57
Tabelle 6 Parameter-Vektor zur Beschreibung der qualitativen Faserstoffeigenschaften ...	74
Tabelle 7 Parameter-Vektor zur Beschreibung der qualitativen Papiereigenschaften.....	75
Tabelle 8 Ökologische Parameter zur Beschreibung der Nachhaltigkeit.....	76
Tabelle 9 Fiberclass Klasseneinteilung.....	79
Tabelle 10 Vektor zur Modellierung der Stoffaufbereitungsprozesse .....	84
Tabelle 11 Messabweichungen von Glührückstand und Stoffdichte.....	102



---

---

## Abbildungsverzeichnis

---

Abbildung 1 Drei-Säulen-Modell der Nachhaltigkeit (Darstellung in Anlehnung an [9] ) ...	6
Abbildung 2 Nachhaltigkeitsdreieck (Darstellung in Anlehnung an [10]) .....	7
Abbildung 3 Abwasseraufkommen in der deutschen Papier- und Zellstoffindustrie [28]...	19
Abbildung 4 Entwicklung der Energieeffizienz in der deutschen Papier- und Zellstoffindustrie [32] .....	20
Abbildung 5 Aufbau eines Drucksortierers [41] .....	23
Abbildung 6 Siebkorbprofile [42] .....	24
Abbildung 7 Rotorbauformen für Drucksortierer (A- Foilrotor, B- Bumprotor, C- radiale Leitschaufeln, D-.Stufenrotor) [43] .....	25
Abbildung 8 Aufbau einer Flotationszelle (Darstellung in Anlehnung an [48]) .....	34
Abbildung 9 Sulzer- Escher Wyss CF-Flotationszelle [49] .....	35
Abbildung 10 Voith EcoCell Flotationsstufe [51] .....	37
Abbildung 11 Schnitt durch eine EcoCell-Flotationszelle [52] .....	37
Abbildung 12 Knet-Disperger der Firma Voith [57] .....	43
Abbildung 13 Schematische Abbildung eines Scheibendispergers [58] .....	44
Abbildung 14 Stoffflussschema eines Sortierprozesses .....	52
Abbildung 15 Stoffflussschema eines Flotationsprozesses .....	53
Abbildung 16 Stoffflussschema eines Dispergierprozesses .....	53
Abbildung 17 Feinsortierung Anlage A – Probenentnahmestellen .....	60
Abbildung 18 Feinsortierung Anlage A – Durchflussmesseinrichtungen .....	61
Abbildung 19 Drucksortierer MultiScreen MSS der Firma Voith [67] .....	62
Abbildung 20 MiniSorter MST der Firma Voith [68] .....	63
Abbildung 21 Feinsortierung Anlage B – Probenentnahmestellen Untersuchung 1 .....	64
Abbildung 22 Feinsortierung Anlage B – Probenentnahmestellen Untersuchung 2 .....	65
Abbildung 23 Feinsortierung Anlage B – Durchflussmesseinrichtungen .....	66
Abbildung 24 Vorflotation Anlage A – Probenentnahmestellen .....	67
Abbildung 25 Vorflotation Anlage A – Durchflussmesseinrichtungen .....	68



Abbildung 26 Nachflotation Anlage A – Probenentnahmestellen.....	69
Abbildung 27 Nachflotation Anlage A – Durchflussmesseinrichtungen.....	69
Abbildung 28 Vorflotation Anlage B.....	70
Abbildung 29 Nachflotation Anlage B .....	71
Abbildung 30 Anlage A Dispergierung .....	72
Abbildung 31 Schematischer Aufbau des Haindl-McNett Fraktionierers [69] .....	77
Abbildung 32 Haindl-Fraktionator zur Bestimmung des Makrostickygehaltes in Deinkingstoffen .....	81
Abbildung 33 Screenshot des alpha-Kalkulationstabellenblattes .....	94
Abbildung 34 Screenshot des Aufbaus des Feed-Vektors für Stufe 1 A .....	95
Abbildung 35 Screenshot des Aufbaus des Berechnungs-Vektors .....	96
Abbildung 36 Feinstoff-, Kurzfaser- und Langfasertrennung in Drucksortierer Stufe 2:1..	97
Abbildung 37 Drucksortierer Stufe 1 A .....	98
Abbildung 38 Gegenüberstellung der Stoffdichte Anlage B .....	100
Abbildung 39 Rückstände der Haindl-Fraktionierung nach INGEDE Methode 4 .....	101
Abbildung 40 Gegenüberstellung des Aschegehaltes Anlage B .....	102
Abbildung 41 Vorflotation - Gegenüberstellung der korrigierten Massenströme .....	105
Abbildung 42 Nachflotation - Gegenüberstellung der korrigierten Massenströme .....	106
Abbildung 43 Screenshot des Trenngrad- Kalkulationstabellenblattes .....	108
Abbildung 44 Anlage A - ERIC-Wert .....	109
Abbildung 45 Anlage A - Weißgrad R457 .....	109

---

## Literaturverzeichnis

---

1. **Butterbrodt, D. ; Dannich-Kappelmann, M. ; Tammner, U. ; Kamiske, G. F.:** Umweltmanagement moderne Methoden und Techniken zur Umsetzung. - München [u.a.]: Hanser, 1995. - XIV, 207 S. S. - ISBN 3446182497
2. **Grunwald, A. ; Kopfmüller, J.:** Nachhaltigkeit eine Einführung. - 2., aktualisierte Aufl. - Frankfurt am Main [u.a.]: Campus-Verl., 2012. - 279 S. S. - ISBN 9783593412313
3. Nomos-Verl.-Ges.: Die Kunst, langfristig zu denken - Wege zur Nachhaltigkeit. - (1. Aufl.). - URL: <http://dx.doi.org/10.5771/9783845245041>
4. Metropolis-Verl.: Nachhaltige Ökonomie ökonomische Theorie und Praxis einer Nachhaltigen Entwicklung. -
5. **Hartard, S.:** Magische Dreiecke - Berichte für eine nachhaltige Gesellschaft. - Marburg: Hartard, Susanne; Stahmer, Carsten; Hinterberger, Friedrich, 2000. -
6. **Endres, A.:** Umweltökonomie. - Stuttgart: Verlag W. Kohlhammer GmbH + Co. KG, 2007. -
7. **Wullenweber, K.:** Wortfang: Was die Sprache über Nachhaltigkeit verrät. - In: Politische Ökologie -, 2000. - S.
8. **Binder, U.:** Nachhaltige Unternehmensführung radikale Strategien für intelligentes, zukunftsfähiges Wirtschaften. - 1. Aufl. - Freiburg [im Breisgau] München [i.e.] Planegg: Haufe-Gruppe, 2013. - 214 S. S. - ISBN 3648037315
9. Warum Nachhaltigkeit? - URL: <http://www.netzwerk-nachhaltigkeit.eu/warum-nachhaltigkeit/>
10. **Baumast, A.:** Betriebliches Nachhaltigkeitsmanagement ; 19 Tabellen. - Stuttgart: Ulmer, 2013. - 413 S. S. - ISBN 9783825236762
11. Vereinte Nationen: AGENDA 21 Konferenz der Vereinten Nationen für Umwelt und Entwicklung -URL: [http://www.un.org/depts/german/conf/agenda21/agenda\\_21.pdf](http://www.un.org/depts/german/conf/agenda21/agenda_21.pdf)
12. **Kuik, O.:** In search of indicators of sustainable development. - Repr. - Dordrecht [u.a.]: Kluwer, 1992. - VII, 126 S. S. - ISBN 079231249X
13. **Hák, T. M., Bedrich; Lyon Dahl,Arthur:** Sustainability Indicators - A Scientific Assessment. - Washington,DC: Island Press, 2007. - - ISBN 9781597261302
14. **Ruedinger:** Erprobung der CSD-Nachhaltigkeitsindikatoren in Deutschland; Bericht der Bundesregierung. - Berlin: Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit,, 2010. -
15. Campus-Verl.: Nachhaltigkeit. - URL: [http://www.content-select.com/index.php?id=bib\\_view&ean=9783593402338](http://www.content-select.com/index.php?id=bib_view&ean=9783593402338)
16. **Schmidt-Bleek, F.:** Wieviel Umwelt braucht der Mensch? MIPS - das Maß für ökologisches Wirtschaften. - 2. [Dr.]. - Berlin [u.a.]: Birkhäuser, 1994. - 302 S. S. - ISBN 3764329599
17. **Grunwald, A.:** Technikfolgenabschätzung - eine Einführung. - 2., grundlegend überarb. und wesentlich erw. Aufl. - Berlin: ed. Sigma, 2010. - 345 S. S.
18. **Friege, H.:** Das Management von Stoffströmen geteilte Verantwortung - Nutzen für alle ; mit 6 Tabellen. - Berlin [u.a.]: Springer, 1998. - VIII, 237 S. S. - ISBN 3540636595
19. **Naujock, H.-J.:** Aufbereitung der Faserstoffe (Halbstoffe). - In: Taschenbuch der Papiertechnik / Ed.: J. Blechschmidt. - München: Carl Hanser Verlag, 2010. - S.

- 
20. **Pufé, I.:** Nachhaltigkeit. - Konstanz: UVK-Verl.-Ges. [u.a.], 2012. - 261 S. S. - ISBN 9783825236670
  21. **Pasckert, A.:** Zukunftsfähige Wertschöpfungskreisläufe. - Hamburg: S + W Steuer- u. Wirtschaftsverl., 1997. - XXVIII, 396 S. S. - ISBN 3891618654
  22. **Runge, M.:** Einfälle statt Abfälle Leitfaden für Bürger, Politiker, Umweltverbände und Kommunen zu einer besseren Müllpolitik. - München: Kyrill-&-Method-Verl., 1990. - 160 S. S. - ISBN 3927527203
  23. **Weizsäcker, E. U. v. ; Lovins, A. B. ; Lovins, L. H.:** Faktor vier doppelter Wohlstand - halbiertes Naturverbrauch ; der neue Bericht an den Club of Rome. - 10. Aufl. - München: Droemer Knaur, 1997. - 352 S. S. - ISBN 3426268779
  24. **Weizsäcker, E. U. v. ; Hargroves, K. ; Smith, M.:** Faktor Fünf die Formel für nachhaltiges Wachstum. - München: Droemer, 2010. - 431 S. S. - ISBN 9783426274866
  25. **Müller-Christ, G.:** Nachhaltiges Management Einführung in Ressourcenorientierung und widersprüchliche Managementrationalitäten. - 1. Aufl. - Baden-Baden: Nomos, 2010. - 426 S. S. - ISBN 9783832953539
  26. **Grunwald, A.:** Technikgestaltung für eine nachhaltige Entwicklung von der Konzeption zur Umsetzung. - Berlin: Ed. Sigma, 2002. - 420 S. S. - ISBN 3894045744
  27. Zukunftstrends: Recyclingpapier und ökologische Nachhaltigkeit. - URL: [http://papiernetz.de/docs/IPR\\_Studie1010.pdf](http://papiernetz.de/docs/IPR_Studie1010.pdf)
  28. **Jung, H. ; Kappen, J. ; Hesse, A. ; Götz, B.:** Wasser- und Abwassersituation in der deutschen Papier- und Zellstoffindustrie. - In: Bd. 9: Wochenblatt für Papierfabrikation -, 2011. - S. 737-739
  29. **Bajpai, P.:** Environmentally friendly production of pulp and paper. - Hoboken, N.J.: Wiley, 2010. - VII, 365 S. S. - ISBN 9780470528105
  30. **Demel, I. ; Balzer, R. ; Dernharer, W. ; Kaindl, N. ; Cordes-Tolle, M. ; Pfaff, D.:** Nachhaltigkeit in der Papierindustrie - Bewertung und Bedeutung. - In: Bd. 11: Wochenblatt für Papierfabrikation -, 2012. - S. 830-833
  31. **Forest Products Association of Canada:** Life Cycle Assessment and Forest Products: A White Paper. - Ottawa, 2010. -
  32. Götz, Bernd: Auswirkungen der Energiepolitik auf die Papierindustrie. -
  33. **Fleiter, T. ; Fehrenbach, D. ; Worrell, E. ; Eichhammer, W.:** Energy efficiency in the German pulp and paper industry – A model-based assessment of saving potentials. - In: Energy. - 40(2012)1. - S. 84-99
  34. **Utlu, Z. ; Kincay, O.:** An assessment of a pulp and paper mill through energy and exergy analyses. - In: Energy. - 57(2013)0. - S. 565-573
  35. Wirtschaftverbände Papierverarbeitung WPV e.V.: Nachhaltigkeit in der Papier verarbeitenden Industrie. - URL: <http://www.wpv-ev.de/wpv-broschure%20a4-web.pdf>
  36. Paper Recycling Monitoring Report 2013. - URL: [http://www.paperforrecycling.eu/uploads/Modules/Publications/WEB\\_monitoring%20report%202013-3.pdf](http://www.paperforrecycling.eu/uploads/Modules/Publications/WEB_monitoring%20report%202013-3.pdf)
  37. **N.N.:** Cleaner-Technologie spart 40 % Kosten. - In: Bd. 6: Wochenblatt für Papierfabrikation -, 2013. - S.
  38. **Bos, J. H.:** Das Papierbuch Handbuch der Papierherstellung. - 1. Aufl. - Houten: ECA Pulp & Paper b.v., 1999. - 608 S. S. - ISBN 9011060385

- 
39. **Götttsching, L. ; Suomen Paperi-Insinöörien Yhdistys:** Papermaking Science and Technology a book series covering the latest technology and future trends 7 Recycled Fiber and Deinking / book Ed.: Lothar Götttsching. - Helsinki: Fapet Oy, 2000. - 649 S. S. - ISBN 9525216004
  40. Pulp and Paper Centre Mechanical Engineering Department University of British Columbia: A Lecture on Pressure Screening. - URL: <http://www.fibrelab.ubc.ca/files/2013/01/Topic-5-Mechanical-Pulping-Screening-text.pdf> - (Stand: 21.08.2003)
  41. **Lönnberg, B. ; Suomen Paperi-Insinöörien Yhdistys:** Papermaking Science and Technology a book series covering the latest technology and future trends 5 Mechanical Pulping / book Ed.: Bruno Lönnberg. - 2., total updated Ed. - Helsinki: Fapet Oy, 2005. - 549 S. S. - ISBN 9789525216004
  42. **Herttuainen, P.:** Fraktioiden tehostaminen lajittelussa. - 114 S. - Lappeenrannan teknillinen yliopisto,, Teknillinen tiedekunta, Kemianteeniikka, Paperi- ja kuitutekniikka, , 2010. URL: <http://www.doria.fi/bitstream/handle/10024/62888/nbnfi-fe201006021942.pdf?sequence=3>
  43. **Ämmälä, A.:** Fractionation of Thermomechanical Pulp in Pressure Screening: An Experimental Study on the Classification of Fibres with Slotted Screen Plates. -: Oulun yliopisto, 2001. - - ISBN 9789514259197
  44. **N.N.:** Papierherstellung im Überblick. - München: PTS, 2008. -
  45. **Brettschneider, W.:** Sortiersysteme - Ein Beitrag zur Auswahl der richtigen Systemschaltung. - In: Bd. 13: Wochenblatt für Papierfabrikation -, 1993. - S. 531-536
  46. **Jokinen, H.:** Screening and cleaning of pulp - A Study to the parameters affecting separation. - Oulu: University of Oulu, 2007. - - ISBN 978-951-42-8451-9
  47. **Linck, E.:** Die neue Escher Wyss CF Flotationszelle zum Deinken von Altpapier - In: Bd. 9: Wochenblatt für Papierfabrikation -, 1985. - S. 316-320
  48. Hubbe, Martin: De-Inking Schematic. - URL: <http://www4.ncsu.edu/~hubbe/DEIN.htm>
  49. - Flotationseinrichtung zur Störstoff-, insbesondere Druckfarbenentfernung aus Altpapiersuspensionen.
  50. **Martin, T. ; Britz, H.:** Die EcoCell, Beispiel für Synergieeffekt bei Weiterentwicklung der Flotationszelle. - Heidenheim: Voith Sulzer Papiertechnik GmbH, 1995. -
  51. **Voith Paper Fiber Systems GmbH & Co. KG:** Flotation EcoCell-Flotationszellen Produktblatt. -, 2007. - 2 S.
  52. Verfahren zur Flotation von Störstoffen aus einer wässrigen Papierfasersuspension: Verfahren zur Flotation von Störstoffen aus einer wässrigen Papierfasersuspension. - Google Patents.
  53. **Körkkö, M. ; Laitinen, O. ; Vahlroos, S. ; Ämmälä, A. ; Niinimäki, J.:** A Theoretical Model of Flotation Deinking Efficiency. - In: Bd. 17(4): Progress in Paper Recycling - Oulu, 2008. - S. 15-22
  54. **Bos, J. H.:** Das Papierbuch Handbuch der Papierherstellung. - 2. Aufl. - Houten: ECA Pulp & Paper b.v., 2006. - 608 S. S. - ISBN 9789001402587
  55. **Bajpai, P.:** Recycling and Deinking of Recovered Paper. -: Elsevier Science, 2013. - - ISBN 9780124171695

56. **Watson, J.:** Deinking Recycled Paper Using Column Flotation --Ottawa, Canada, McGill University, Department of mining and Metallurgical Engineering 1996.  
URL: <http://www.collectionscanada.gc.ca/obj/s4/f2/dsk2/ftp01/MQ29636.pdf>,  
<http://www.collectionscanada.gc.ca/obj/s4/f2/dsk2/ftp01/MQ29636.pdf>
57. **Wiley-VCH:** Handbook of paper and board. - (2., rev. and enl.). - URL:  
<http://dx.doi.org/10.1002/9783527652495>
58. **Kriebel, A. ; Mannes, W. ; Niggel, V.:** Dispersion, stickies and optical cleanliness.  
- In: twogether Magazin für Papiertechnik - Heidenheim: Voith Sulzer Papiertechnik GmbH & Co. KG, 1998. - S.
59. **Niggel, V.:** Further development of a well-proven dispersing system. - Heidenheim Voith Sulzer Papiertechnik GmbH, 1996. -
60. **J&L FiberServices Inc.:** Refining system optimization - A simple six step process.  
- Waukesha, Wisconsin, 2004. -
61. **Luukkonen, A.:** Development of a methodology to optimize low consistency refining of mechanical pulp. - 87 S. - Vancouver, The University of British Columbia, Mechanical Engineering, 2011. URL:  
[https://circle.ubc.ca/bitstream/id/124123/ubc\\_2011\\_fall\\_luukkonen\\_antti.pdf](https://circle.ubc.ca/bitstream/id/124123/ubc_2011_fall_luukkonen_antti.pdf),  
[https://circle.ubc.ca/bitstream/id/124123/ubc\\_2011\\_fall\\_luukkonen\\_antti.pdf](https://circle.ubc.ca/bitstream/id/124123/ubc_2011_fall_luukkonen_antti.pdf)
62. **Hamann, L. ; Meinl, G.:** Minimierung von Rohstoff- und Prozesskosten bei Sicherung definierter optischer Eigenschaften AP-basierter Papiere. - München: Papiertechnische Stiftung, -
63. **Meinl, G.:** Gezielte Einstellung der Mahlungsbedingungen in der Gemischtmahlung von Zellstoffen durch ein Simulationswerkzeug. -, - 51 S.
64. **León, J. ; Hortal, M. ; Hohenthal, C. ; Hakala, J. ; Meinl, G. ; Schabel, S.:** D4.1 Integration Framework. - In: -, 2014. - S.
65. **Normenausschuss Grundlagen des Umweltschutzes (NAGUS) im DIN:** Umweltmanagement - Ökobilanz - Grundsätze und Rahmenbedingungen (ISO 14040:2006). -: Beuth Verlag GmbH, 2006. -
66. **Berninger, B.:** Methodik der betrieblichen Stoffflussanalyse am Beispiel der Lackherstellung. -, 1994. - III, 175, 118 S. S.
67. **Voith Paper Fiber Systems GmbH & Co. KG:** Sortieren MultiScreen™ MSS. -, -
68. **Voith Paper Fiber Systems GmbH & Co. KG:** Sortieren MiniSorter MST Produktblatt. -, -
69. **Stumm, D.:** Untersuchungen zum chemischen Wasserrückhaltevermögen und zur Trocknungsfähigkeit von Papierstoffen unter besonderer Berücksichtigung der Rolle von chemischen Additiven -<http://tuprints.ulb.tu-darmstadt.de/epda/000824/Stumm002007.pdf>000177 S. - Darmstadt, Technische Universität Darmstadt, 2007.

---

## Formelzeichenverzeichnis

---

$P_A$	W	Aufgenommene Leistung
$P_{NL}$	W	Leerlaufleistung
$P_{eff}$	W	Reine Mahlleistung
$P_p$	W	Durchtrittsverhältnis (pulp passage ratio)
$\dot{V}$	l/min	Volumenstrom
$\dot{m}$	kg/min	Massenstrom
A		Ausbeute
b		Konstante
BEL	m	Stablänge (bar edge length)
c	% oder g/l	Stoffdichte
c		Konstante
CEL		Sek. Kantenlänge (cutting edge length)
d		Konstante
$E_R$		Trenngrad (reject efficiency)
ERIC		Effective Residual Ink Concentration
F	kg otro/s	Dispergerdurchsatz
FI		Flotable/Free Ink
FIRE		Free Ink Removal Efficiency
FS		Feinstoffbereich
IE		Ink Elimination
IR		Ink Removal
KF		Kurzfaserbereich
LF		Langfaserbereich
$Q_K$		Q-Index nach Karnis
$Q_N$		Q-Index nach Nelson
$RR_m$		massenbezogene Rejektrate
$RR_v$		volumenbezogene Rejektrate
SEL		Spez. Kantenbelastung (specific edge load)
SRE	kWh/t	Spez. Mahlenergie
T	°C	Temperatur
X		Massenanteile des Füllstoffes in Suspension
Y		Stoffeigenschaft oder Helligkeit
Z		Massenbez. Faseranteile in Feed, Accept...
Z		Anzahl der Stäbe des Rotors
$\Phi$		Fraktionierungsindex
w		Gewichtanteil
$\alpha$		Maschinenspezifische Sortierkonstante
$\eta$		Wirkungsgrad



---

## **Indizes**

1	Input
2	Output
A	Accept
D	Durchlauf
F	Feed oder Füllstoff (fillers)
HW	Hypergewaschen (hyperwashed)
i	Platzhalter einer Fraktion i
I	Accept (bei Q-Index Ermittlung)
II	Rejekt (bei Q-Index Ermittlung)
in	Feed
out	Accept/Rejekt
R	Rejekt oder Rotor
res	residual
S	Stator
T	total
Ü	Überlauf
W	Woody material
X	Platzhalter für F, A und R
Z	Zulauf

## **Abkürzungen**

AB	Abwasser
AL	Abluft
bspw.	beispielsweise
bzw.	beziehungsweise
CCD	Charge-coupled device
CF	Compact Flotation
CSF	Canadian Standard Freeness
DIN	Deutsches Institut für Normung e.V.
EN	Europäische Norm
EU	Europäische Union
IDM	Induktives Durchflussmessgerät
INGEDE	International Association of the Deinking Industry
IPR	Initiative pro Recycling
ISO	Internationale Organisation für Normung
LCA	Life Cycle Analysis
LIC	Level indication control (Füllstandsmessung)
MIPS	Material-Intensity per Service-Unit
otro	ofentrocken
PIA	Pressure indication alarm
ppm	Parts per million
PPS	Parker-Print-Surf





RECO	Zellcheming e.V: Fachausschuss
RTF	Altpapierverwertung
SCT	Eindickrate (reject thickening factor)
SMART	Streifenstauchwiderstand (short crush test)
	Spezifisch-Messbar-Akzeptiert-Realistisch-Terminiert
sog.	sogenannt(-e; -er; -es)
TAPPI	Technical Association of the Pulp and Paper Industry
TGA	Thermogravimetriemessgerät
VBA	Visual Basic Application
vgl.	vergleiche
WRV	Wasserrückhaltevermögen (water retention value)
WW	Siebwasser (white water)
z.B.	zum Beispiel